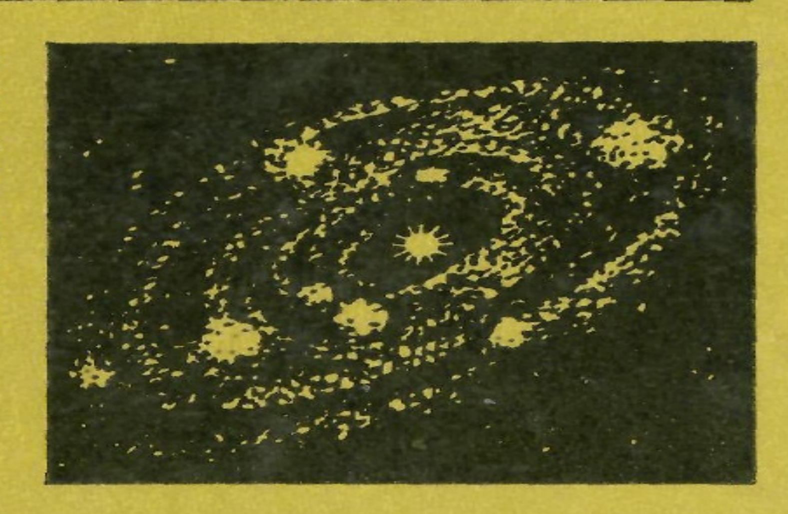
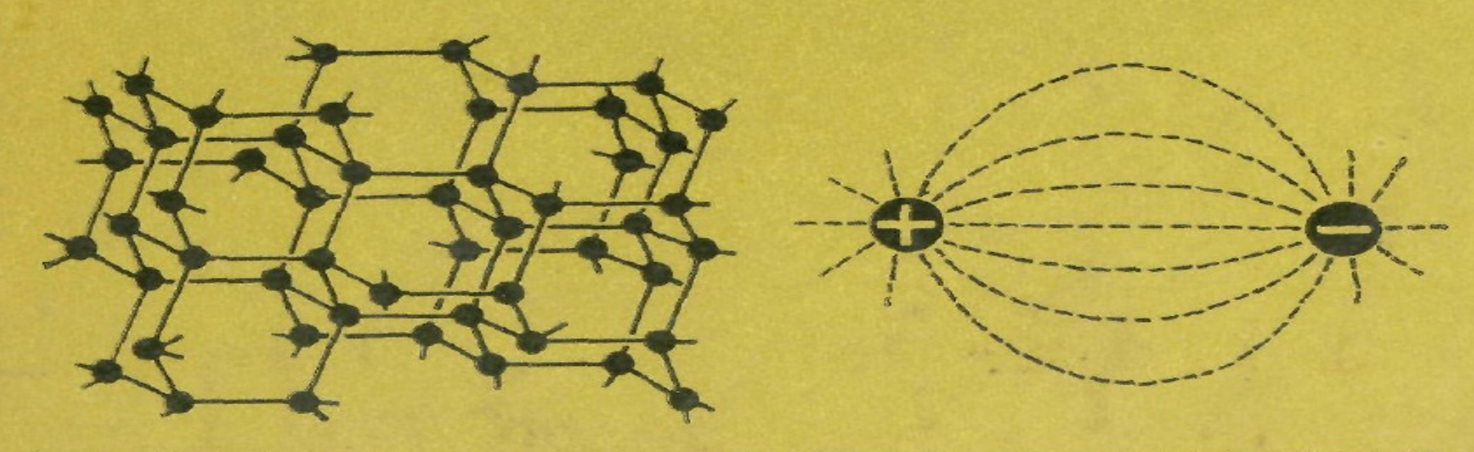
ciencia popular

Fuerzas en la naturaleza

V. Grigóriev, G. Miákishev

El mérito del presente libro consiste en que por primera vez en la literatura de divulgación científica se brinda la imagen total y única de todas las interacciones en la naturaleza





Editorial · Mir · Moscú

ciencia popular

Las fuerzas en la naturaleza

V. Grigóriev,
G. Miákishev

EDITORIAL MIR MOSCÚ

Traducido del ruso por K. Steinberg

На испанском языке

Impreso en la URSS

ÍNDICE

CAPÍTULO CUARTO
FUERZAS ELECTROMAGNÉTICAS EN ACCIÓN

CAPÍTULO QUINTO
FUERZAS NUCLEARES

CAPÍTULO SEXTO
INTERACCIONES DÉBILES

CAPÍTULO SÉPTIMO
FUERZAS "¿?" Y LAS PARTÍCULAS ELEMENTALES

CONCLUSIÓN

PREÁMBULO DE LOS AUTORES

A primera vista, parece infinitamente complejo el cuadro de las interacciones en la naturaleza. Sin embargo, toda su diversidad se reduce, en fin de cuentas, a un número muy pequeño de fuerzas fundamentales.

¿Qué representan estas fuerzas fundamentales? ¿Cuántas son? ¿De qué modo se ve reducido a éstas todo el cuadro complejo de relaciones en el mundo que nos rodea? Precisamente sobre estos temas hablamos en el presente libro.

La primera edición rusa de este libro se publicó hace dos decenios, aproximadamente. En este período, las ideas principales acerca de las interacciones fundamentales, en un grado considerable, quedaron sin cambiar. No obstante, aparecieron muchos datos nuevos. Y no sólo se trata de que han sido descubiertas nuevas partículas, nuevos efectos y nuevas clases de objetos físicos y astrofísicos, y de que cada descubrimiento de esta índole añade nuevos e importantes rasgos al cuadro general de manifestaciones de las interacciones fundamentales. Se

puede hablar de la tendencia —explícitamente revelada— a introducir en este cuadro unas modificaciones de principio: considerar de una manera íntegra, unificada, dos tipos (de los cuatro) de interacciones fundamentales, las electromagnéticas y las débiles.

Se perfila la posibilidad de construir una teoría única de todas las interacciones.

El escribir este libro fue interesante, aunque costaba trabajo redactar algunos fragmentos. Probablemente, también la lectura de este libro exija a veces algunos esfuerzos.

Palabras, palabras, palabras.
William Shakespeare, *Hamlet*

CAPÍTULO I

EN LUGAR DE INTRODUCCIÓN

1. "Fuerza" en el habla cotidiana

Desde la fuerza de la pasión hasta la fuerza del vapor

La palabra "fuerza" estableció un récord *sui géneris*. Cualquier diccionario de la lengua, casi sin excepción, concede a la explicación de esta voz quizá el mayor espacio. Así, por ejemplo, en el "Diccionario de la lengua rusa viva" redactado y publicado en la década de los sesenta del siglo pasado por Vladímir Dahl se puede leer que la fuerza es la "fuente, origen y causa fundamental (desconocida) de cualquier acción, aspiración e impulso, de cualquier transformación material en el espacio, o bien: principio de la modificación de los fenómenos mundiales". Sin embargo, esta prolija descripción no agota el "quid de la cuestión". ¿Cómo le gustará otra definición de la fuerza dada por el mismo Vladímir Dahl: "La fuerza es concepto abstracto de la propiedad general de la materia y de los cuerpos que nada explica, sino que, solamente, recoge todos los fenómenos uniéndolos bajo un concepto y nombre común"?

La diversidad de las acepciones en las cuales se emplea la palabra "fuerza" es, verdaderamente, asombrosa: figuran aquí fuerza animal

Estamos lejos del pensamiento de intentar explicar por qué la palabra "fuerza" adquirió acepciones diferentes, ya que "es imposible abarcar lo inabarcable", sobre todo, quedándose dentro de los marcos de las ciencias naturales.

Y aquellas "fuerzas en la naturaleza" sobre las cuales se habla en el título de este libro son objeto de estudio de la física.

Tartarín y el acelerador

La física... No en vano ésta se encuentra en la primera fila de las ciencias exactas. El lector, de seguro, se acuerda de la fama que había traído al célebre vecino de Tarascón su admirable certeza en el tiro a las gorras. Pero evidentemente, incluso Tartarín se sentiría desconcertado si le propusieran lanzar una bala que, después de varias decenas de miles de kilómetros, debería dar en una moneda de un centímetro de diámetro. Y es que los físicos resolvieron un problema semejante en los gigantescos aceleradores de partículas elementales.

El movimiento de enormes cuerpos cósmicos, los trayectos de los cohetes, procesos que se desarrollan en el seno de los átomos, la desintegración y las transmutaciones de las partículas elementales: todo un océano de fenómenos es descrito y, además, descrito cuantitativamente, con una asombrosa exactitud, por las leyes de la física.

Por lo demás, en los tiempos de instrucción general obligatoria cada persona tiene cierta idea sobre esta ciencia. No importa qué opinión formen de ella, a algunos hasta puede parecer aburrida, mas no hay quien tenga derecho a reprocharla de inexactitud cuando se trata de la definición de los conceptos básicos de la física. Es natural pensar que precisamente en la física el concepto de fuerza puede definirse de una

manera unívoca y exacta. La física, en un grado considerable, justifica estas esperanzas, sin embargo, como lo veremos más adelante, las cosas distan mucho de ser tan simples.

Vamos a ver, ante todo, cómo este concepto entró en la ciencia y qué transformaciones experimentó con el correr del tiempo. La voz "fuerza" no fue inventada nuevamente ni tomada de un idioma muerto, como ocurrió con la mayoría de los términos científicos: electrón, entropía, interferencia, etc. Entró en la ciencia procediendo de una lengua viva y, por esta razón, no inmediatamente, ni mucho menos, y con bastante trabajo se purificó de los matices inherentes a su empleo cotidiano.

¿Qué es más comprensible: la caída de una piedra o el movimiento del gato?

Las sensaciones que aparecen en el hombre cuando eleva una carga y cuando pone en movimiento los cuerpos circundantes y su propio cuerpo sentaron la base para la comprensión de la fuerza en la mecánica. Sin embargo, "por cuanto a cada aplicación consciente por hombre de la fuerza precede un acto de voluntad, detrás del concepto físico de fuerza se buscaba algo más profundo, metafísico, se buscaba cierta tendencia inherente a los cuerpos; por ejemplo, en el caso de fuerza de gravedad, una tendencia a unirse con lo similar a sí mismo. A nosotros nos es difícil comprender este punto de vista" (Laue, "Historia de la Física"). A semejanza de un caminante cansado que acelera sus pasos a medida que se acerca a su casa —razonaban los sabios de la Antigüedad— la piedra cayendo comienza a moverse cada vez con mayor velocidad al aproximarse a la tierra madre. Por muy extraño que nos parezca a nosotros, en aquella época

el movimiento de los organismos vivos, por ejemplo, de un gato, se percibía como mucho más simple y comprensible que la caída de una piedra.

2. Fuerza en la mecánica

Qué visión del mundo tenía Newton

Tan sólo Galileo y Newton lograron liberar totalmente el concepto de fuerza de "tendencias", "deseos" y otros rasgos de semejante índole propios de la materia animada. La mecánica clásica de Galileo y Newton se convirtió en la cuna de la comprensión científica de palabra "fuerza".

En la tumba del creador de la mecánica clásica Newton están esculpidas las siguientes palabras:

Aquí yace
Sir Isaac Newton

Quien con la fuerza casi divina de su mente
Explicó por primera vez
Con la ayuda de su método matemático
Los movimientos y las formas de los planetas,
Las rutas de los cometas, los flujos y reflujos del océano.
Fue el primero en investigar la diversidad de los rayos luminosos
Y las peculiaridades de los colores que de aquí provenían
Y que nadie ni siquiera sospechaba hasta aquella época.
Interpretador aplicado, perspicaz y correcto
De la Naturaleza, de las Antigüedades y de la Sagrada Escritura

Glorificó en su doctrina al Todopoderoso
Creador.
Con su vida demostró sencillez requerida por
el Evangelio.
Que se alegren los mortales que en medio
de ellos
Vivió tal ornato del género humano.

Nació el 25 de diciembre de 1642.
Murió el 20 de marzo de 1727.

No solamente a sus contemporáneos, sino también a muchas generaciones de hombres de ciencia asombró y sigue asombrando hasta el día de hoy el majestuoso e íntegro cuadro del mundo creado sobre la base de los trabajos de Newton.

Según Newton, todo el mundo consta de "sólidas, ponderables, impenetrables y móviles partículas". Estas "partículas primarias son absolutamente sólidas: son inconmensurablemente más sólidas que los cuerpos formados por las mismas; son sólidas hasta tal grado que nunca se desgastan ni se rompen haciéndose añicos". Las partículas se diferencian unas de otras, principalmente, por sus características cuantitativas. Toda la riqueza y toda la diversidad cualitativa del mundo es resultado de las diferencias en el movimiento de las partículas. Lo fundamental en este cuadro del mundo es el movimiento. La esencia intrínseca de las partículas de la materia queda en el segundo plano: lo primordial es cómo se mueven estas partículas.

Leyes del movimiento de Newton

La razón de este cuadro íntegro del mundo reside en el carácter universal de las leyes del movimiento de los cuerpos descubiertas por Newton, a las cuales éste impartió una estricta forma matemática. Con una precisión admirable se someten a estas

leyes tanto los gigantescos cuerpos celestes, como los minúsculos granitosos de arena arrastrados por el viento. Y hasta el viento —el movimiento de partículas de aire invisibles — también está sujeto a las mismas leyes.

La idea central de las leyes del movimiento de Newton es la siguiente:

La variación en el estado de movimiento (o sea, de velocidad) de los cuerpos se provoca por la acción recíproca de éstos.

¿Pero no es que dicho enunciado es axiomático, se sobreentiende? No, nada de eso. Newton, en pos de Galileo, logró disipar definitivamente uno de los errores más arraigados de la humanidad acerca de las leyes del movimiento de los cuerpos. Comenzando por Aristóteles, en el curso de casi veinte siglos, todo el mundo estuvo convencido de que el movimiento con velocidad constante necesita, para mantenerlo, una acción del exterior, necesita cierta causa activa. Sin tener esta asistencia el cuerpo, obligatoriamente, se parará.

Al parecer, esta opinión encuentra confirmación en nuestra experiencia cotidiana. Por ejemplo, un automóvil con el motor desconectado se para incluso en un camino totalmente horizontal. En igualdad de las demás condiciones, la velocidad de un automóvil es tanto mayor cuanta mayor potencia desarrolla el motor. Lo mismo se puede decir refiriéndose a una lancha, una bicicleta, un barco de vapor, etc. Ésta es la razón de que incluso en nuestro tiempo se pueden encontrar hombres los cuales consideran el movimiento de la misma manera que Aristóteles, aunque, desde luego, no se dan cuenta de ello. En la realidad, un cuerpo aislado, es decir, un cuerpo que no está en interacción con ninguna otra cosa, siempre se mueve con velocidad constante. Con frecuencia, se suele de-

cir que el cuerpo se mueve por inercia. Tan sólo la acción proveniente de otro cuerpo es capaz de alterar su velocidad. La única causa de que es necesario aplicar esfuerzos para mantener constante la velocidad reside en que en las condiciones ordinarias siempre existe una resistencia que oponen al movimiento la tierra, el aire o el agua. Como se dice, existe el rozamiento. De no ser por éste la velocidad del automóvil no disminuiría ni siquiera con el motor desconectado.

Pero esta cosa, por ejemplo, no la podía comprender, de ningún modo, el estúpido y vanílocuo coronel Kraus von Zillergut a quien el bravo soldado Sveijk, protagonista de la famosa novela de Jaroslav Hasek, robó su perro píncher. "Cuando toda la gasolina se había consumido —decía el coronel— el automóvil se vio obligado a detenerse. Esto yo lo había visto ayer con mis propios ojos. Y después, señores, charlotean aún sobre la inercia. No se marcha, está parado, no se pone en movimiento. No hay gasolina. ¿Acaso no es para reír?"

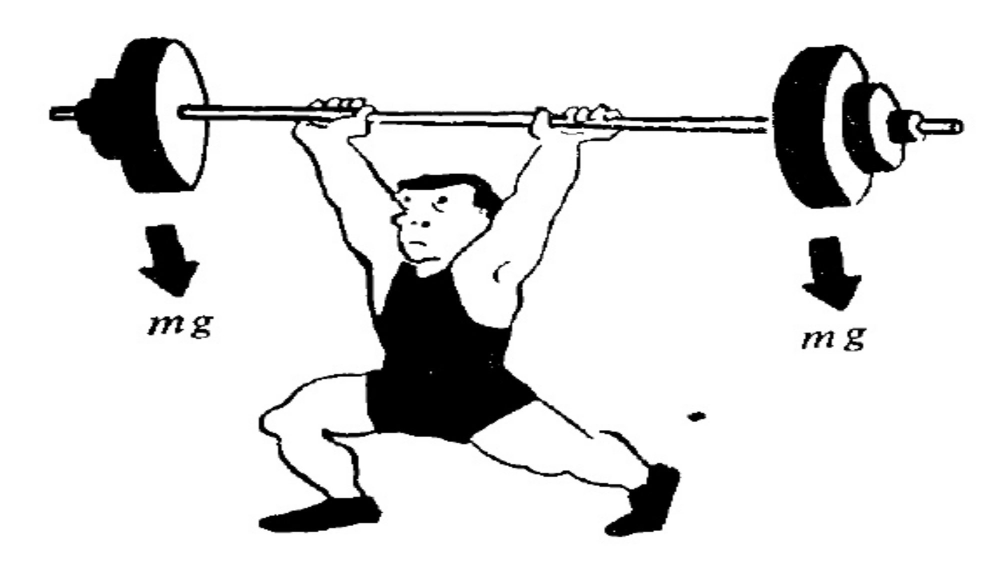
Lo más admirable en las leyes del movimiento de Newton es su exacta forma cuantitativa. No solamente podemos hablar sobre cierta interacción de los cuerpos, somos capaces de medir esta interacción. La medida cuantitativa de acción de los cuerpos unos sobre otros se denomina en la mecánica fuerza.

Qué hay de común entre la fuerza muscular y la gravitación

Ahora bien, las acciones sobre el cuerpo dado pueden ser muy diversas. Al parecer, ¿qué hay de común entre la fuerza con que la Tierra se ve atraída al Sol y aquella fuerza la cual, superando la gravitación, hace moverse el cohete?

¿O entre estas dos fuerzas y la común y corriente fuerza muscular? Es que éstas son absolutamente distintas por su naturaleza. Estos términos encierran fenómenos diferentes. ¿Es posible hablar sobre dichas fuerzas como sobre algo afín desde el punto de vista de la física? Sí, contesta la mecánica de Newton, es posible. En este caso, aquí, en la mecánica nada más que se ha generalizado la experiencia cotidiana de cada uno de nosotros.

Cuando un hombre no puede levantar una cosa pesada, dice que: "le faltan fuerzas". En este caso, hablando con propiedad, tiene lugar la comparación de dos fuerzas completamente diferentes por su naturaleza: de la fuerza muscular y de la fuerza con que la Tierra atrae dicho objeto. Pero si uno ha levantado un objeto pesado y lo mantiene en vilo, nada le impide afirmar que la fuerza muscular de sus manos equivale por su magnitud a la fuerza de la gravedad.



Este último enunciado, en esencia, no es sino la definición de la igualdad de fuerzas en la mecánica. Dos fuerzas, independientemente de su naturaleza se consideran iguales y dirigidas

en sentidos opuestos si su acción simultánea sobre el cuerpo no cambia su velocidad. Con ello, se abre la posibilidad para la comparación de las fuerzas, y si una de ellas se elige arbitrariamente como fuerza patrón, la posibilidad para medirlas.

Panikovski e inercia

Fíjense: lo principal en nuestra definición de la fuerza es la relación con el movimiento. Si el cuerpo es inmóvil, las fuerzas que actúan sobre éste se equilibran. En cambio, si las fuerzas no se equilibran mutuamente, en este caso, y solamente en éste, varía el estado del movimiento del cuerpo. El cuerpo adquiere una aceleración cuya magnitud, de acuerdo con las leyes del movimiento de Newton, es directamente proporcional a la magnitud de la fuerza pero *no depende*, en absoluto, *del origen de esta fuerza*. Aquí se puede citar una inmensa cantidad de ejemplos. Elijamos, al azar, un ejemplo que, si no es el más aleccionador, por lo menos no es el más aburrido: se trata de un episodio tomado de la novela "El becerro de oro" de Ilya Ilf y Evgueni Petrov describiendo el robo de pesas, de dos puds cada una. "Panikovski llevaba su lote con ambas manos, sacando la barriga y resollando alegremente... En ocasiones, no podía, de ningún modo, doblar la esquina porque la pesa, por inercia, seguía arrastrándole hacia adelante. Entonces, Balagánov, con su mano libre, lo agarraba por el cuello dando a su cuerpo la necesaria dirección".

En el caso dado, la acción externa por parte de Balagánov comunicaba aceleración al cuerpo de Panikovski, una aceleración necesaria para cambiar la dirección de la velocidad al doblar la esquina.

Cabe señalar que la variación de la velocidad del cuerpo depende no sólo de la fuerza, sino también del propio cuerpo. Sin la pesa las flojas piernas de Panikovski habrían podido comunicarle suficiente aceleración, de modo que éste, felizmente, habría podido doblar la esquina.

La propiedad del cuerpo que determina la rapidez con que cambia su velocidad por acción de la fuerza en la mecánica lleva el nombre de masa (o masa inerte). De acuerdo con la segunda ley de Newton, la aceleración (o sea, la variación de la velocidad por unidad de tiempo) de un cuerpo es proporcional a la fuerza que sobre éste actúa e inversamente proporcional a su masa.

Así, pues, en la mecánica clásica tenemos una definición estricta de aquello que es fuerza. Esta definición incluye el método de medición de las fuerzas. La acción de las fuerzas se relaciona de un modo cuantitativo exacto con la aceleración. La mecánica es la única ciencia "en que realmente se sabe lo que es una fuerza".*

El precio de la universalidad

Sin embargo, también en la mecánica la situación con las fuerzas difícilmente puede calificarse de brillante. Sigue siendo sin esclarecer el problema de por qué, por efecto de qué procesos físicos aparecen tales o cuales fuerzas. Por lo visto, tambien el propio Newton experimentaba esta sensación. A él le pertenecen las siguientes palabras: "No sé qué parezco ser yo al mundo, pero a mí mismo yo me parecía un niño jugando a la orilla del mar que se divertía

---

* F. Engels, *Dialéctica de la naturaleza*. Ed. Girjalbo, México, 1961, págs. 59—60.

al encontrar de vez en cuando una piedrecita más lisa o una concha más hermosa que de costumbre, mientras que el gran océano de la verdad se extendía ante mí totalmente ignoto".

En la mecánica las dificultades que atañen a la naturaleza de las fuerzas suelen declararse insustanciales meramente debido a la negativa de hablar sobre éstas. Semejante enfoque es del todo posible. Para calcular las trayectorias del movimiento de los cuerpos es suficiente conocer a qué es igual la fuerza cuantitativamente. Pues, conocer el valor de las fuerzas, determinar cuándo y cómo éstas actúan, es posible sin profundizarse en la naturaleza de las mismas y disponiendo tan sólo de métodos de su medición. Precisamente por esta razón en la mecánica "no hay necesidad de que la definición de la fuerza explique qué es la fuerza en sí y qué representa: la causa o el efecto del movimiento" (Henri Poincaré). La circunstancia de que la naturaleza de las fuerzas no es sustancial para la mecánica constituye un defecto de esta ciencia, pero, al mismo tiempo, es su ventaja. Ésta es la causa, precisamente, de que la mecánica describe, con éxito, tanto el movimiento de las moléculas, como el de las estrellas.

Este hecho es maravilloso, pero, a pesar de todo, queda una "mancha oscura". Y no es de extrañar que, debido a ello, los científicos, sintiendo la falta de completa claridad en la comprensión de la fuerza, todo el tiempo trataron de superar estas dificultades. Unos lo hacían pasando de la introducción algo formal de las fuerzas a los intentos de realizar un análisis más profundo de la naturaleza de las interacciones; otros, como, por ejemplo, el célebre físico alemán H. Hertz, en general, borraban de la mecánica el concepto de la fuerza.

Mecánica sin las fuerzas y fuerzas sin la mecánica

Hertz logró construir la mecánica sin utilizar, en absoluto, el concepto de fuerza, mas, como resultó en cierto sentido, la "cosa no merecía la pena". La exclusión de la fuerza de la mecánica implicó, por un lado, la necesidad de introducir nuevas hipótesis y, por otro lado, complicó hasta tal grado la formulación de los principios básicos de la mecánica que todo el esquema de Hertz, en su conjunto, no obtuvo reconocimiento.

Reviste interés señalar que la insuficiente claridad en la comprensión de la naturaleza de las fuerzas que dio lugar a los intentos de expulsar la fuerza de la ciencia surtió al mismo tiempo un efecto diametralmente opuesto. El término "fuerza" comenzó a "trashumar" de la mecánica a otros ámbitos de la ciencia, perdiendo por el camino aquel grado de rigurosidad que tuviera tiempo a adquirir en los marcos de la mecánica. F. Engels escribía con este motivo: "...cuando se da a una causa de movimiento el nombre de fuerza, en nada se atenta contra la mecánica en cuanto tal; pero, al acostumbrarse a esta expresión y hacerla extensiva a la física, a la química y a la biología, la confusión es inevitable".*

Desde la época en que fueron escritas estas líneas transcurrieron muchos años. En lo fundamental, los físicos se libraron de semejantes tendencias. No obstante, hasta la fecha, en la terminología se conservaron las repercusiones del período a que se remitía Engels. Acuérdense, por ejemplo, de la fuerza electromotriz (la cual,

* F. Engels, *Dialéctica de la naturaleza*. Ed. cit., pág. 62.

en esencia, no es fuerza sino trabajo) o de la fuerza viva (energía cinética): ninguno de estos conceptos guarda relación alguna con la fuerza en su sentido mecánico ordinario.

3. ¿Es que la interacción siempre se puede caracterizar por medio de fuerzas?

La filantropía de Roberto Mayer

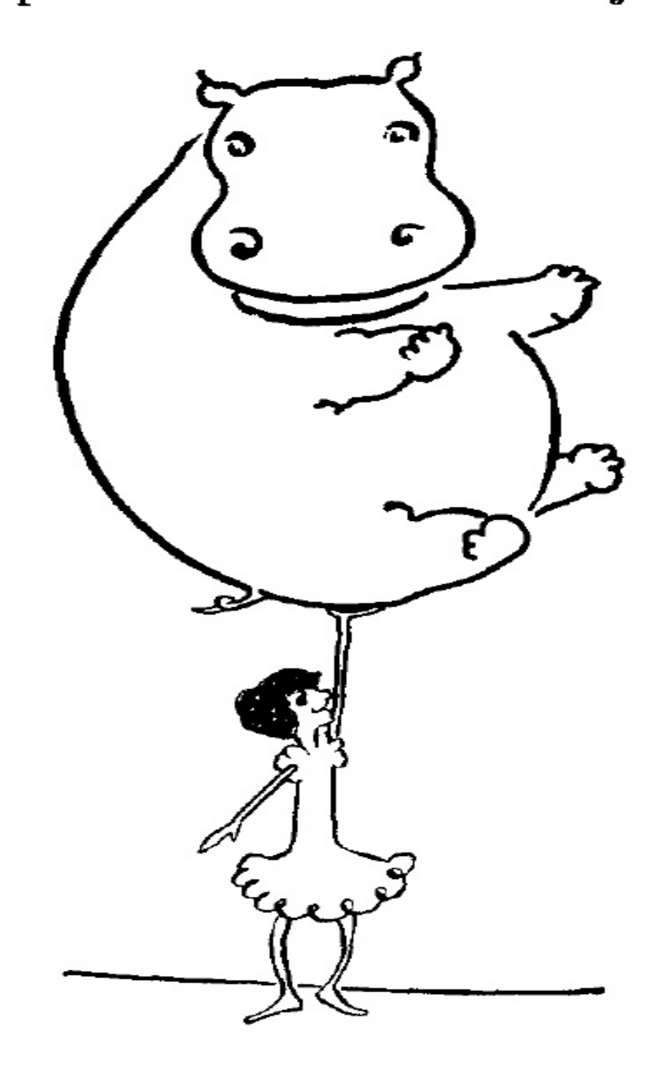
Ya nos hemos referido a los infructuosos intentos de expulsar la fuerza de la mecánica. Sin embargo, aunque en la mecánica clásica la fuerza se conservó, el desarrollo de la física, en su totalidad, demostró, no obstante, que no toda interacción, ni mucho menos, puede caracterizarse por completo mediante fuerzas mecánicas. Al *principio*, *fue difícil suponer que a la* fuerza le amenaza cualquier peligro. La mecánica creada por Newton seguía desarrollándose. A la par de la fuerza fue introducida una serie de otros conceptos: la cantidad de movimiento, la energía, etc. Poco a poco la energía* comenzó a cobrar cada vez mayor importancia. Al igual que la fuerza, la energía podía caracterizar cuantitativamente la interacción de los cuerpos, y no sólo la interacción, sino también el estado de su movimiento.

En la mecánica la energía se determina tanto por las velocidades de los cuerpos, como por el carácter de la acción recíproca de cuerpos (esta última cosa es para nosotros de especial importancia). Más aún, resultó que todas las tesis fundamentales de la mecánica de Newton podían traducirse totalmente, por decirlo así, al

---

* Cabe señalar que la propia palabra "energía" al principio no se empleaba.

lenguaje energético. Ambas descripciones del movimiento, tanto la de fuerza, como la energética, son equivalentes*: el trabajo de la fuerza



es igual a la variación de la energía. Y en cuanto a la propia energía de un sistema de cuerpos, ésta puede considerarse como la reserva del trabajo que es capaz de realizar dicho sistema. Hablando en general, para sistema aislado la cantidad de energía mecánica no queda constante: ésta disminuye si existe el rozamiento.

La situación cambió radicalmente cuando a

---

* Si no se examinan las fuerzas dependientes de la velocidad, por ejemplo, la fricción.

mediados del siglo XIX encontró su exacta formulación la ley fundamental de las ciencias naturales modernas, o sea, la ley de conservación de la energía.

Uno de los creadores de esta ley, Roberto Mayer, dio la siguiente evaluación de su importancia: "Actualmente, para obtener el acceso a la ciencia sobre el movimiento no necesitamos subir primeramente a las alturas de la matemática; por el contrario, la naturaleza, por sí misma, se presenta en su sencilla hermosura ante los ojos embelesados, y hasta una persona de dotes no muy grandes es capaz de advertir multitud de cosas las cuales, hasta la fecha, quedaron ocultas a los más brillantes científicos".

La ley de conservación afirma que la energía con la cual trataba la mecánica no desaparece sin dejar huella cualesquiera que sean las condiciones. Únicamente, puede transformarse de una forma en otra. Al desaparecer la energía en su forma mecánica se engendra la misma cantidad, exactamente, de energía de otro tipo. Por ejemplo, puede tener lugar el calentamiento de los cuerpos.

"El huevo..." "suelta la sin hueso"

La energía resultó ser una característica cuantitativa universal del movimiento y de la interacción de todos cuerpos, desde los objetos cósmicos hasta las partículas elementales. La ley de conservación y transformación de la energía no se limita al movimiento mecánico, y por ello no es de extrañar que la descripción de las interacciones por medio de energía resultase más general que recurriendo a las fuerzas. Pero en los marcos de la mecánica de Newton a ninguna de estas descripciones puede darse una preferencia incondicional.

Las transformaciones de la energía de una forma a la otra pueden compararse con las traducciones de las palabras comunes y corrientes a diferentes idiomas. La traducción cambia el "aspecto exterior" de la palabra, su trazado y pronunciación, pero la propia palabra, en este caso, por ejemplo, "huevo", "das Ei" (alem), "the egg" (ingl.), "l'oef" (fr.), etc., designa un mismo objeto.



Si seguimos ateniéndonos a esta comparación, resulta que las fuerzas se parecen más bien a las expresiones idiomáticas (por ejemplo, "soltar la sin hueso", "en el quinto infierno", etc.) que están llenos de sentido y profundidad tan

sólo en la lengua que las creó (aquí se trata del lenguaje de la mecánica), convirtiéndose en absurdas cuando se someten a la traducción literal.

Hoy día puede parecer curioso el hecho de que al principio, antes de que se afirmara el término "energía", para designar la nueva magnitud física también se hizo uso de la palabra fuerza. El trabajo de Helmholtz con cuyo nombre (a la par de Mayer y Joule) está relacionado el descubrimiento de la ley de conservación de la energía llevaba el nombre de "Memoria sobre la fuerza". "Si accedemos una sola vez a que la palabra fuerza se emplee en su sentido doble, entonces, después, será un trabajo de Sísifo tratar de marcar la diferencia en todos los casos particulares" —escribía Mayer. Casi durante toda su vida Mayer insistió en que la palabra fuerza se conservase para designar aquello que, en la actualidad, denominamos energía. No es difícil figurarse qué "confusión babilónica de lenguas" puede producirse en este caso.

Debido a la mayor universalidad del concepto de energía, con el tiempo no pudo dejar de tener lugar el desalojamiento paulatino de la descripción mediante fuerzas por la energética.

Cuando las leyes de Newton se declaran en huelga

Es que el concepto de fuerza tiene un sentido cuantitativo exacto solamente en la mecánica, mientras que el concepto de energía abarca los procesos de cualquier naturaleza: existen energía térmica, energía electromagnética, energía nuclear, etc. La descripción newtoniana del movimiento está adoptada a los casos en que las fuerzas relativamente simples dan lugar a los movimientos que pueden resultar suficientemente

complejos. Así, por ejemplo, las fuerzas de la gravitación universal expresadas de una forma bastante sencilla conducen a trayectorias muy complejas de los planetas, si se toma en consideración no sólo la atracción de los planetas al Sol, sino también sus influencias recíprocas. Ahora figúrense que de la descripción del movimiento de un número reducido de cuerpos se pasa al estudio de centenares, miles, millones, etc., de partículas. Por supuesto, uno puede consolarse con la ilusión de que, "de principio", la mecánica de Newton estaría en condiciones de describir, de un modo absolutamente exacto, también estos sistemas, o sea, determinar en cualquier instante la posición y la velocidad de cualquier partícula. Sin embargo, en la realidad, aquí el enfoque mecánico, en general, pierde el sentido. El propio planteamiento exacto del problema (determinación de las posiciones iniciales y de las velocidades de las partículas, así como la fijación de las fuerzas de interacción entre éstas) representa no menores dificultades que su resolución. En efecto, el comportamiento del conjunto de un gran número de partículas pone de leyes que no se reducen a la mecánica: las leyes de la física estadística.

La suma de fuerzas en un vaso de agua

En la física estadística, desde el mismo principio, se renuncia a los intentos de seguir el movimiento de partículas aisladas, procediendo a analizar a la vez el comportamiento medio de un gran conjunto de éstas. Así, pues, por cuanto la energía se conserva, podemos hablar con plena razón sobre la energía media la cual poseen las partículas del sistema. Pero la fuerza media de la interacción de las partículas no se

conserva, de modo que para un conjunto grande de las mismas este concepto carece de sentido.

Las fuerzas de interacción entre las diferentes parejas de partículas del sistema son iguales por su magnitud y están dirigidas al encuentro de unas a otras. Ésta es la razón de que la *suma total de fuerzas que actúan en el interior del sistema* en general es igual a cero. Se puede hablar solamente de aquella fuerza media con la cual el *sistema* (por ejemplo, el gas en un cilindro) *actúa sobre algún cuerpo ajeno* (por ejemplo, sobre el émbolo que cierra el paso al gas).

Cabe señalar una circunstancia más. El cambio de estado de una sustancia por influjo de acciones externas siempre está relacionado con la variación de su energía. Sin embargo, esta variación no es igual al trabajo de las fuerzas, como es propio de la mecánica. Una cafetera puesta sobre el hornillo encendido hierve tranquilamente, aunque no se ven las fuerzas y no se realiza el trabajo mecánico.

Acerca de una gran discusión

Mucho antes de que en la ciencia nacieran las ideas acerca del movimiento molecular y de su descripción estadística, en el seno de la propia mecánica surgió una pregunta, a primera vista no muy importante: ¿es que la interacción entre los cuerpos se realiza instantáneamente o bien, para ello, se requiere un tiempo determinado?

En los capítulos dedicados a las fuerzas gravitacionales y electromagnéticas hablaremos detalladamente sobre la discusión entre los partidarios de la "acción a distancia", es decir, de la interacción instantánea inmediatamente a través del espacio vacío sin cualesquiera intermediarios, y aquellos quienes pugnaban por la idea

de la acción de corto alcance o la acción próxima diametralmente opuesta a la primera. Los argumentos que bozaron un viraje en esta discusión aparecieron simultáneamente con la creación de la teoría de los fenómenos electromagnéticos. Y estos argumentos resultaron ser a favor de la acción de corto alcance. Aquí, por primera vez y con toda claridad se puso de manifiesto que la noticia sobre cada carga o sobre la corriente no se propaga al instante a cualesquiera distancias, que la transmisión de la interacción se opera tan sólo en el transcurso de un tiempo determinado. En otras palabras, cualquier "señal" se propaga a una velocidad aunque muy grande, pero no infinita. Apenas esta tesis quedó demostrada, en el acto se planteó el problema: ¿y qué dirá la mecánica de Newton? Es que en la mecánica las acciones de los cuerpos, unos sobre otros, siempre resultan recíprocas. Por ejemplo, la fuerza con que el libro presiona sobre la mesa es igual por su magnitud y opuesta por la dirección a la que acciona por el lado de la mesa al libro. De acuerdo con la tercera ley de Newton la acción es siempre igual a la reacción.

Ahora bien, si trasladamos rápidamente una de las dos cargas que interaccionan, la otra carga durante cierto lapso no lo percibirá. Sobre la segunda carga actuará la fuerza anterior, mientras que la primera, apenas trasladada, se encontrará inmediatamente expuesta a la acción de las fuerzas que han cambiado. La acción resulta no igual a la reacción.

Este hecho no es una nimiedad y, como lo veremos más adelante, tampoco es un detalle casual. El asunto en que el *campo electromagnético que interviene como intermediario durante la interacción de las cargas no es un sistema mecánico*, es decir, no puede describirse por la

mecánica de Newton. No se puede hablar sobre el campo electromagnético como sobre un sistema de puntos materiales que se mueven de acuerdo con las leyes de la mecánica newtoniana. En este caso, para describir el objeto no sirve ni el propio lenguaje de la mecánica, ni todo el arsenal de sus imágenes.

· Si bien se puede hablar sobre la acción de las fuerzas sobre la partícula por parte del campo, ya no se puede hablar sobre la fuerza que actúa sobre el campo por parte de la partícula. ¡Este hecho es de suma importancia! En el caso de que la descripción mecánica pierde el sentido es necesario introducir cualesquiera otras medidas de interacción. Su búsqueda no requiere mucho tiempo. También aquí la energía interpreta excelentemente este papel.

La situación en la teoría de los fenómenos electromagnéticos no es, ni mucho menos una excepción. *El punto de vista de acción de corto alcance, es decir, de interacción por medio de tales o cuales campos, que conquistó hoy en día un dominio indiscutible, pone restricciones en la utilización de las fuerzas como instrumento para la descripción de las interacciones.*

No se puede colocar un muelle en el átomo

A pesar de todas las complicaciones relacionadas con la introducción de los campos, la mecánica de Newton, sin embargo, trabaja con todo éxito al describir, por ejemplo, el movimiento de cuerpos cargados en los campos electromagnéticos prefijados. (Se sobreentiende que los campos electromagnéticos no están sujetos a las leyes de la mecánica que extienden su poder tan sólo al movimiento de los propios cuerpos.) Pero incluso esta utilidad "a medias" de la mecánica

dista mucho de tener lugar en todos los casos.

En el reino de las partículas elementales con la *auyda* de las fuerzas no se puede describir la interacción no *solamente de colectividades* grandes de partículas, sino también de los individuos aislados que lo habitan.

En la mecánica se admite que el cuerpo se mueve por una trayectoria determinada y en cada punto de la trayectoria tiene una velocidad determinada. Por acción de la fuerza esta velocidad varía de punto en punto. Ahora bien, en el caso del *movimiento* de las partículas elementales la velocidad en el *punto carece de cualquier* valor determinado. Una partícula elemental, por ejemplo un electrón no puede considerarse *meramente* como una bolita de dimensiones muy pequeñas. Sin duda alguna, el electrón se desplaza en el espacio con el curso del tiempo, pero este movimiento no se puede figurar patentemente como traslación a lo largo de cierta línea, o sea, *trayectoria*. Y en cuanto a la medición de la fuerza, en el micromundo es imposible hacerlo directamente, recurriendo a la ayuda de una balanza de muelle. No se puede colocar en el *átomo un muelle* para medir la fuerza de interacción del electrón con el núcleo.

Hablando en general, toda la mecánica clásica y, junto con ésta, también el concepto de fuerza son inaplicables a las partículas elementales. Mediante las fuerzas no se puede caracterizar de una forma exacta la interacción de las partículas elementales en los átomos y en los núcleos atómicos. Aquí, es la *descripción* energética la que se hace únicamente posible. La energía es tan universal que la ley de conservación de la *misma* se extiende también a

las partículas elementales, con la particularidad de que en este caso adquiere una forma más complicada.

La fuerza es interacción

Sea como sea, también en la física atómica se habla, con frecuencia, acerca de las fuerzas. Seguramente, todo el mundo llegó a oír sobre las fuerzas nucleares que actúan en el núcleo atómico, sobre las fuerzas electromagnéticas de interacción de los electrones, etc. En estos casos nos encontramos con una nueva acepción, y como esperamos, con la última de esta admirable palabra. Éstas ya no son aquellas fuerzas con las que tiene que tratar la mecánica. *El término "fuerza" se convierte aquí en sinónimo de la palabra "interacción"*. No se trata ya de magnitud cuantitativa exactamente determinada la cual se puede medir y se puede sustituir en la ecuación que describe procesos reales. No es sino, meramente, una definición cualitativa del tipo de interacción, o sea, indicación de su naturaleza.

De este modo, en la ciencia moderna el vocablo "fuerza" se utiliza en dos sentidos: en primer lugar, en el sentido de fuerza mecánica, siendo en este caso una medida cuantitativa exacta de la interacción; en segundo lugar —y con mucha mayor frecuencia— designa, simplemente, la presencia de la interacción de un tipo determinado y de cuya medida cuantitativa exacta puede servir tan sólo la energía. Al hablar, por ejemplo, sobre las fuerzas nucleares tenemos en cuenta precisamente la segunda acepción de esta palabra. Es imposible, de principio, incluir las fuerzas nucleares en el marco de la mecánica de Newton.

Por supuesto, se podría prescindir del empleo de la fuerza en esta nueva acepción. En cierto

sentido éste es un paso hacia atrás. No obstante, a todas luces, la costumbre de emplear esta palabra es tan arraigada y ésta se afianzó tan fuertemente en el idioma que se conservará también en el futuro.

No sólo en el idioma comúnmente empleado, sino también en el lenguaje científico las palabras viven su propia vida especial, y no se pueden echar ni con la ayuda de argumentos "sensatos" en contra de las mismas, ni en orden legislativo.

4. Unidad de las fuerzas de la naturaleza

¿Cuántas fuerzas hay en la naturaleza?

Tomamos la decisión de dar a este libro el nombre de "Las fuerzas en la naturaleza", teniendo en cuenta, principalmente. la segunda acepción de dicha palabra en la ciencia moderna. Sin embargo, en un gran número de casos, las fuerzas a que nos referiremos en adelante pueden entenderse también en el "sentido mecánico" más estrecho.

Nuestro relato, en primer término, estará dedicado a la naturaleza de las fuerzas, es decir, a la cuestión que la mecánica se niega a someter al examen. Aquí, en seguida, surge el problema de importancia primordial: ¿cuántos tipos diferentes de fuerzas, o sea, tipos de interacción existen en el mundo?

Actualmente, cuando se habla sobre la unidad de la naturaleza, suele tenerse en cuenta la unidad en la estructura de la materia: la totalidad de los cuerpos están estructurados tan sólo de varias especies de partículas elementales. Sin embargo, en ello se manifiesta solamente un lado

de la unidad de la naturaleza. No es menos sustancial otra cosa.

A pesar de la asombrosa diversidad de las interacciones de los cuerpos las que, en fin de cuentas, se reducen a la acción recíproca de las partículas elementales, en la naturaleza, de conformidad con los datos modernos, se tienen no más que cuatro tipos de interacciones: la gravitación universal, así como interacciones electromagnéticas, nucleares y débiles*. Entre éstas tan sólo dos primeros tipos pueden considerarse en el sentido de la mecánica newtoniana. Nos encontramos con todos los cuatro tipos de fuerzas al estudiar lo que se desarrolla en los infinitos espacios del Universo y en nuestro planeta, así como investigando cualquier pedazo de sustancia, organismos vivos, átomos, núcleos atómicos y las transformaciones mutuas de las partículas elementales.

Tenemos muchos conocimientos acerca de las interacciones gravitacionales, electromagnéticas, nucleares y débiles.

¿Qué es, entonces, lo que se entiende como fuerzas de los cuatro tipos dados? ¿Por qué y de qué modo, apoyándonos en éstas, podemos explicar un número enorme de fenómenos?

Precisamente la respuesta a estos interrogantes constituye el contenido del presente libro.

La unidad de las fuerzas de la naturaleza está vinculada indisolublemente con la unidad en la estructura de la materia. No sólo lo primero no puede concebirse sin lo segundo, sino más bien se puede decir que lo uno y lo otro expresa las diferentes facetas de la unidad del mundo

---

* No abordamos el problema de las llamadas interacciones no relacinadas con la fuerza que en la mecánica cuántica se expresan por el principio de exclusión de Pauli.

encerrada intrínsecamente en la naturaleza de las cosas. Al número relativamente pequeño de especies de partículas elementales corresponde una cantidad aún menor de tipos de interacciones entre éstas. Además, según la opinión de los teóricos esta cantidad debe disminuir todavía.

¿Qué problemas abordará el libro?

Ahora nuestro relato versará sobre la más importante. ¿Qué representan los tipos enumerados de interacciones y cómo éstas fueron descubiertas? ¿De qué modo la infinita diversidad con que se manifiestan las acciones recíprocas de los cuerpos unos sobre otros puede explicarse por las pocas leyes generales? ¿Cuál es la esfera de acción de las diferentes fuerzas en la naturaleza y cuál es el papel que a éstas pertenece en los distintos procesos? Tenemos que relatar sobre la relación recíproca de fuerzas; sobre aquella armonía de las fuerzas de la naturaleza que asegura la estabilidad relativa, así como el ininterrumpido desarrollo y la renovación del Universo donde todas las fuerzas son necesarias en igual medida. Finalmente, no se pueden soslayar, silenciándolos los actuales intentos (bastante felices) de crear la teoría única de todas las fuerzas en la naturaleza.

Daremos comienzo a nuestro relato por donde en la física se inició el proceso de estudio de la naturaleza de las fuerzas. Empezaremos contando sobre las fuerzas de la gravitación universal, o sea, sobre las fuerzas gravitacionales. Las fuerzas gravitacionales se encuentran en el inicio de aquella asombrosa cadena de descubrimientos que dio lugar al establecimiento de la unidad de las fuerzas de la naturaleza.

Poblaban las estrellas el firmamento,
¡ya antaño!
Lucían las auroras a los hombres,
¡ya antaño!

Omar Khayyam, *Rubaiyat*

CAPÍTULO II

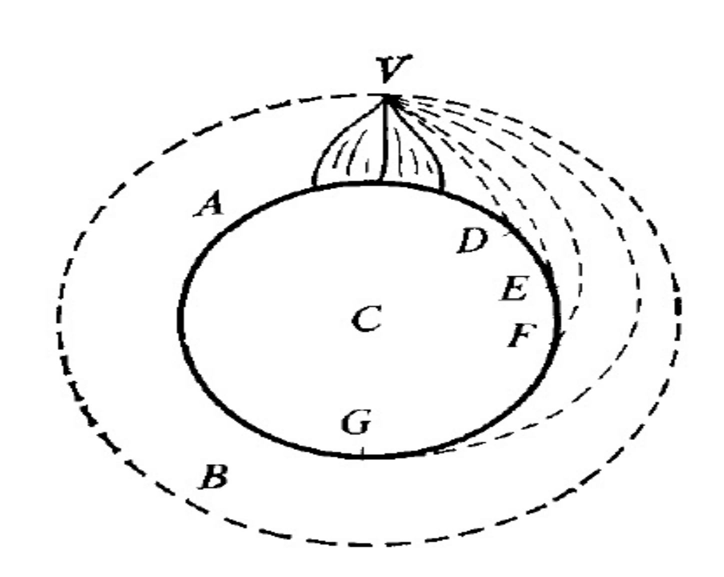
FUERZAS DE GRAVITACIÓN

1. Desde Anaxágoras hasta Newton

Una caída sin fin

En los "Principios matemáticos de la filosofía de la naturaleza" del gran Newton hay un dibujo cuyo número es 213 y que es remarcable porque, a pesar de toda su sencillez, éste permite comprender el profundo nexo que existe entre la mecánica "terreste" y la mecánica "celeste". En el pie de este dibujo se dice: "La piedra lanzada se desviará, por acción de la gravedad, del camino rectilíneo y, al describir una trayectoria curva, caerá finalmente en la Tierra. Si la piedra se lanza con mayor velocidad, caerá más lejos". Prosiguiendo estos razonamientos Newton llega a la conclusión de que, si no hubiera sido por la resistencia del aire, después de haber alcanzado una velocidad suficiente la trayectoria se haría tal que la piedra, en general, podría nunca caer en la superficie de la Tierra comenzando a moverse alrededor de ésta "a semejanza de como los planetas describen en el espacio celeste sus órbitas". No se puede dejar de recordar estas palabras, sobre todo hoy en día, después de los numerosos lanzamientos de satélites artificiales y naves cósmicas.

De este modo, el movimiento de los planetas, por ejemplo, de la Luna alrededor de la Tierra, o el de la Tierra alrededor del Sol es la misma caída, pero una caída tal que dura infinitamente largo*. Ya la causa de esta "caída", ya sea que se trata, efectivamente, de la caída de una piedra común y corriente en la Tierra, o bien, del movimiento de los planetas por sus órbitas, es la fuerza gravitacional.



Los sabios, ya mucho antes que Newton, conjeturaban la unidad de las causas que rigen el movimiento de los planetas y la caída de los cuerpos celestes. Por lo visto, el primero quien enunció explícitamente esta idea fue el filósofo griego Anaxágoras, oriundo de Asia Menor, que residía en Atenas hace más de dos mil años. El sabio afirmaba que la Luna, si no hubiera sido por su movimiento, habría caído en la Tierra como lo hacía la piedra lanzada por una honda. ¿No es verdad que está bien dicho, sobre todo, si se tiene en cuenta que esta idea fue

* En todo caso, si se abstrae de la transición de la energía en formas "no mecánicas".

expresada con más de veinte siglos de anterioridad a Newton.

Sin embargo, la genial suposición de Anaxágoras, evidentemente, no ejerció influencia práctica alguna sobre el desarrollo de la ciencia. El destino dispuso que esta idea resultó no comprendida por los contemporáneos y olvidada por los descendientes. Los pensadores de la Antigüedad y de la Edad Media cuya atención atraía el movimiento de los planetas se hallaban muy lejos de la interpretación correcta (y, las más de las veces, en general, de cualquiera que sea interpretación) de este movimiento. Es que incluso el gran Kepler quien a precio de una gigantesca labor supo formular las leyes matemáticas exactas del movimiento de los planetas consideraba que la causa de este movimiento es la rotación del Sol.

De acuerdo con las ideas de Kepler, el Sol, al girar, con impulsos constantes arrastra a los planetas en la rotación. Por cierto, quedaba incomprensible por qué el tiempo de revolución de los planetas alrededor del Sol se diferencia del período de revolución del Sol alrededor de su eje. Kepler escribió al respecto: "...si los planetas no hubieran poseído resistencias naturales, sería imposible señalar las causas que les impidieran seguir puntualmente la rotación del Sol. Sin embargo, a pesar de que en la realidad todos los planetas se mueven en la misma dirección en que se realiza la rotación del Sol, la velocidad de su movimiento no es igual. La cuestión reside en que éstos mezclan en ciertas proporciones la rutina de su propia masa con la velocidad de su movimiento".

Kepler no pudo comprender que la coincidencia de las direcciones del movimiento de los planetas alrededor del Sol con la de la rotación del Sol alrededor de su eje no está relacionada con las

leyes del movimiento de los planetas, sino con el origen de nuestro sistema solar. Un planeta artificial puede ser lanzado tanto en la dirección de la rotación del Sol, como contra esta rotación.

Fue Roberto Hooke quien se acercó mucho más que Kepler al descubrimiento de la ley de la atracción de los cuerpos. He aquí sus palabras genuinas tomadas del trabajo intitulado "Intento de estudio del movimiento de la Tierra" publicado en 1674: "Voy a desarrollar una teoría que en todos los aspectos concuerda con las reglas de la mecánica comúnmente reconocidas. Esta teoría se basa en tres suposiciones: primero, que todos los cuerpos celestes, sin excepción, poseen una atracción o gravedad dirigida a su centro, gracias a la cual dichos cuerpos atraen no solamente sus propias partes, sino también todos los cuerpos celestes que se encuentran en la esfera de su acción. De acuerdo con la segunda suposición todos los cuerpos que se mueven de modo rectilíneo y uniforme se desplazarán siguiendo una línea recta hasta que estén desviados por una fuerza cualquiera y comiencen a describir trayectorias desplazándose por un círculo, una elipse o alguna otra curva menos simple. Conforme a la tercera suposición las fuerzas de atracción actúan con tanta mayor intensidad cuanto más cerca de ellos se encuentran los cuerpos sobre los cuales los primeros ejercen su acción. Yo todavía no he podido establecer, por medio del experimento, cuáles son los diferentes grados de atracción. Pero si seguimos desarrollando esta idea los astrónomos tendrán la posibilidad de determinar la ley acorde a la cual se mueven todos los cuerpos celestes".

Realmente, sólo se puede maravillar que el propio Hooke no quiso dedicarse a desarrollar estas ideas alegando su ocupación con otros trabajos.

La historia del descubrimiento por Newton de la ley de la gravitación universal se conoce bastante bien. Por esta razón, no creemos que valga la pena relatar detalladamente que, por primera vez, la idea de que la naturaleza de las fuerzas las cuales hacen caer la piedra, así como de aquellas que determinan el movimiento de los cuerpos es la misma, surgió cuando Newton era todavía estudiante, que los primeros cálculos no arrojaron resultados correctos, por cuanto los datos sobre la distancia entre la Tierra y la Luna existentes en aquella época eran inexactos, y que al cabo de 16 años acerca de esta distancia aparecieron nuevos datos ya corregidos. Entonces, después de que se verificaron nuevos cálculos abarcando los movimientos de la Luna, de todos los planetas del sistema solar descubiertos para aquel período y de los cometas, como asimismo de las mareas, la teoría vio la luz.



Con pleno derecho, el descubrimiento de la ley de la gravitación universal se considera uno de los más grandes triunfos de la ciencia. Y a la par que este triunfo se relaciona con el nombre de Newton, surge el deseo involuntario de preguntar: ¿cuál es razón de que fue precisamente este naturalista genial y no, por ejemplo, Ga-

lileo, descubridor de las leyes de la caída libre de los cuerpos (quien, a propósito, dedicó a la astronomía mucha más atención que Newton), o Roberto Hooke u otro cualquiera de sus ilustres precursores o contemporáneos quien logró hacer dicho descubrimiento?

No se trata aquí de una mera casualidad, y el quid de la cuestión no reside en las manzanas caídas y ni siquiera en el grado de genialidad, aunque esta última circunstancia es, por supuesto, muy sustancial. Aquí, como primordial y determinativo, interviene el hecho de que en las manos de Newton se hallaban las leyes descubiertas por él mismo y aplicables a la descripción de cualesquiera movimientos. Precisamente estas leyes, aquello que hoy en día llamamos mecánica de Newton, permitieron comprender con plena evidencia que la raíz de todos los fenómenos, la base que determina las particularidades del movimiento son las fuerzas. Newton fue el primero quien comprendió con absoluta claridad *qué, precisamente*, era necesario buscar para explicar el movimiento de los planetas: *lo que era necesario buscar fueron las fuerzas, y solamente las fuerzas.*

Kepler estableció con exactitud las trayectorias de los planetas del sistema solar y se halló de qué modo las posiciones de los planetas en el espacio varían con el curso del tiempo. Para una trayectoria dada la ecuación del movimiento permite determinar inmediatamente la fuerza que origina el movimiento en cuestión. Este problema, precisamente, fue resuelto por Newton.

¿Qué representan, entonces, estas fuerzas? ¿Cuál es su papel y el lugar que les pertenece en la naturaleza? Y, por fin, ¿cuál es su origen físico?

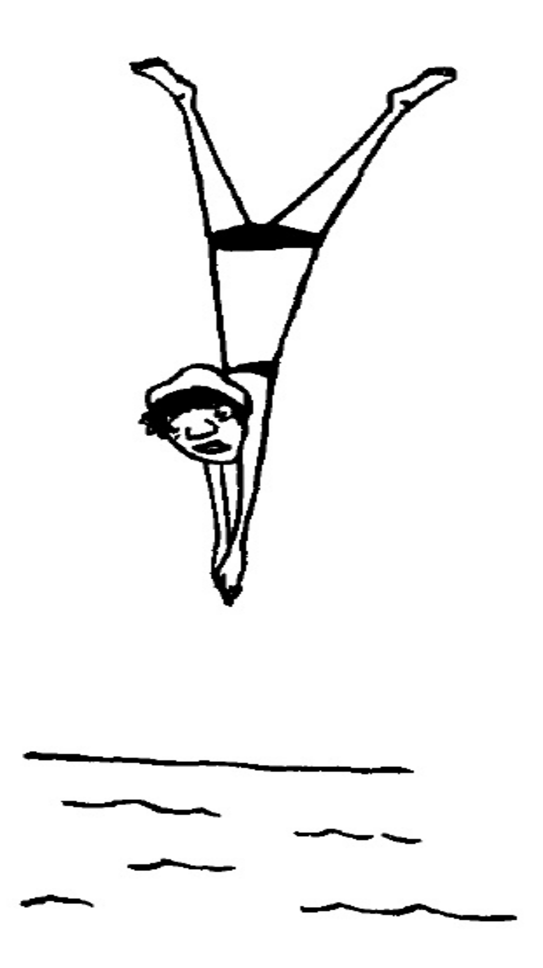
Como ve el lector, los interrogantes son muchos, y hasta la fecha no podemos ofrecer su resolución exhaustiva. A estas preguntas debe dar

la respuesta la física del futuro. Sin embargo, muchas cuestiones, y, en primer lugar, la propia ley de la gravitación universal formulada, con precisión, por Newton, ya hace tiempo llegaron a ser el patrimonio de la ciencia.

2. Ley de la gravitación universal

Actúan sobre cualquier cosa y no conocen barreras

Una de las propiedades más remarcables de las fuerzas de la gravitación universal o, como se denominan con frecuencia, de las fuerzas gravitacionales se refleja ya en su nombre dado por Newton: *universales*. Estas fuerzas, si se puede decir así, son "las más universales" entre todas las fuerzas de la naturaleza. Todo aquello que tiene masa —y ésta es inherente a cualquier forma y a cualquier tipo de materia— debe experimentar los influjos gravitacionales. Ni siquiera la luz constituye una excepción. Si nos figuramos las fuerzas gravitacionales palmariamente, en forma de hilos finísimos que se extienden de unos cuerpos a otros, un sinnúmero de estos hilos debería de atravesar el espacio en cualquier lugar. Con este respecto no sería de sombra señalar que romper semejante hilito, protegiéndose de las fuerzas gravitacionales es imposible. Para la gravitación universal no existen barreras. Siempre podemos eregir una muralla infranqueable para el campo eléctrico (puede servir de tal obstáculo una pantalla hecha de cualquier material con bastante buena conducción); también como es sabido, el campo magnético no penetrará en el interior de un superconductor. Pero la interacción gravitacional se transmite libremente a través de cualesquiera cuerpos. Solamente en la imaginación de los autores de libros de ciencia-ficción pueden existir pan-



tallas confeccionadas de sustancias especiales impenetrables para la gravitación (como, por ejemplo, el "cavorite" de la novela de H.Wells *Los primeros hombres en la Luna*).

Relativamente hace poco apareció la comunicación acerca de las mediciones realizadas por el astrónomo francés Allain durante un eclipse solar. Al parecer, del análisis de los resultados de estas mediciones se desprendía que existe cierta sombra gravitacional, que la fuerza de atracción de la Tierra por el Sol disminuye cuando entre estos astros se encuentra la Luna. ¿Y qué resultó en la realidad? Simplemente, no se tuvo en cuenta la variación de la temperatura de los instrumentos que era inevitable durante el eclipse. Fue este efecto insignificante a primera vista el que indujo en error al astrónomo. Hace poco tiempo, el físico soviético V.B.Bra-

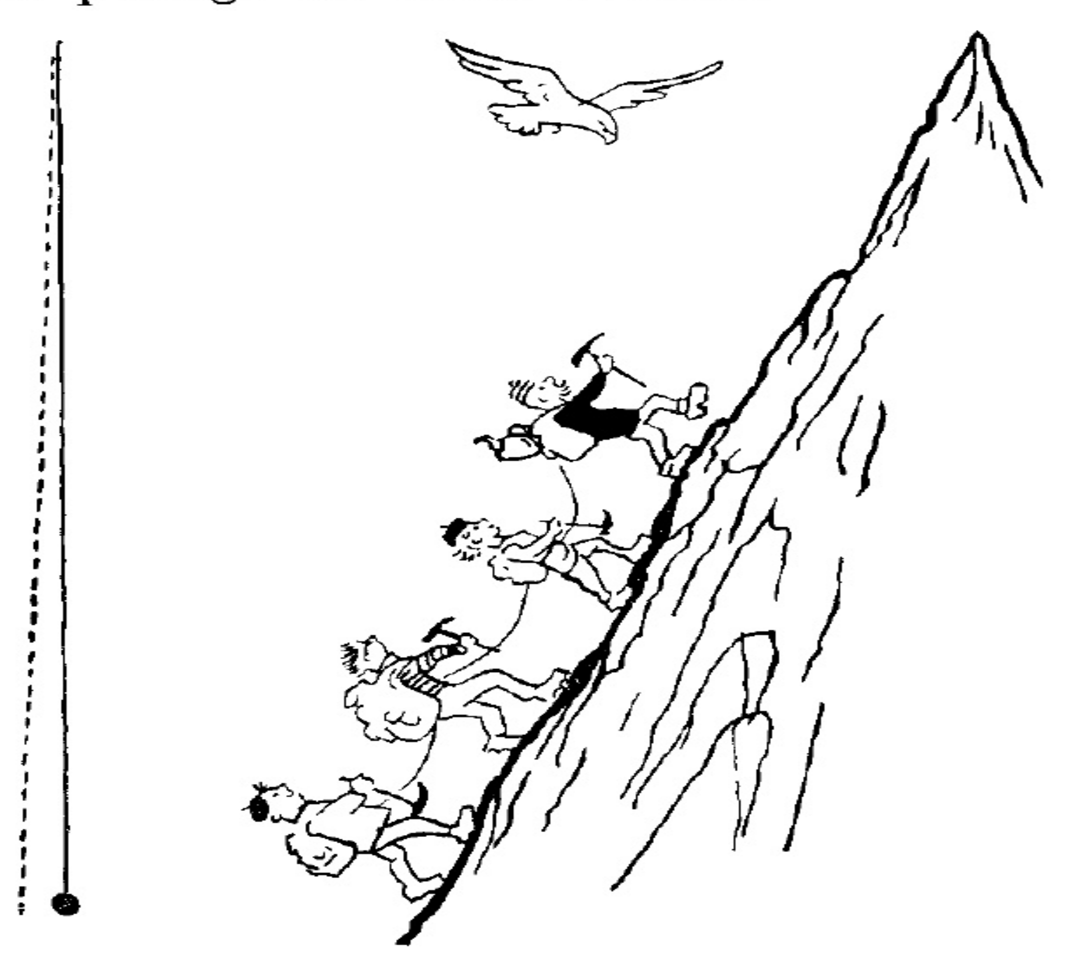
guinski, con una precisión récord —la de 10^{-12} del peso del cuerpo— logró demostrar experimentalmente la ausencia de sombra gravitacional.

¿Cuán grandes son las fuerzas gravitacionales?

Así, pues, las fuerzas gravitacionales son omnipresentes y omnipenetrantes. ¿Por qué, entonces, no percibimos la atracción de la mayoría de los cuerpos? ¿Por qué, por ejemplo, la atracción de la Tierra se hace sentir a cada paso, mientras que las montañas, incluso las más altas, estas enormes moles de piedra, si bien atraen algo hacia sí, no es otra cosa que las águilas y los alpinistas? Si se calcula qué parte de la atracción de la Tierra constituye, digamos, la de Everest (en las condiciones más favorables en el sentido de la disposición), resultará que esta parte constituye tan sólo unas milésimas de la unidad en tanto por ciento. En cuanto a la fuerza de atracción mutua de dos personas de peso medio separadas por una distancia de un metro, dicha fuerza no supera tres centésimas de miligramo. Tan débiles son las fuerzas gravitacionales. Es posible que algunos lectores se detengan aquí asombrados. ¡¿Débiles?! ¿Cómo puede calificarse de débil la "maroma" con cuya ayuda es posible colgar la Tierra del Sol o la Luna de la Tierra, particularmente, si se toman en consideración las enormes distancias que les separan? Preguntas perplejas de esta índole surgían más de una vez. El conocido popularizador de la ciencia Ya.I.Perelman* informa, por ejemplo, sobre la aparición a finales del siglo XIX del libro de Carpenter

* Véase: Ya.Y. Perelmán, *Física recreativa.* Editorial Mir. Moscú, 1980. (*Nota de la Red.*)

"La ciencia contemporánea" cuyo autor se refería a que la extraordinaria debilidad de las fuerzas gravitacionales de la que se hace constancia en la física socava, en general la confianza hacia esta ciencia. Reviste interés señalar que este libro se publicó acompañado de un benévolo prologó de León Tolstói.



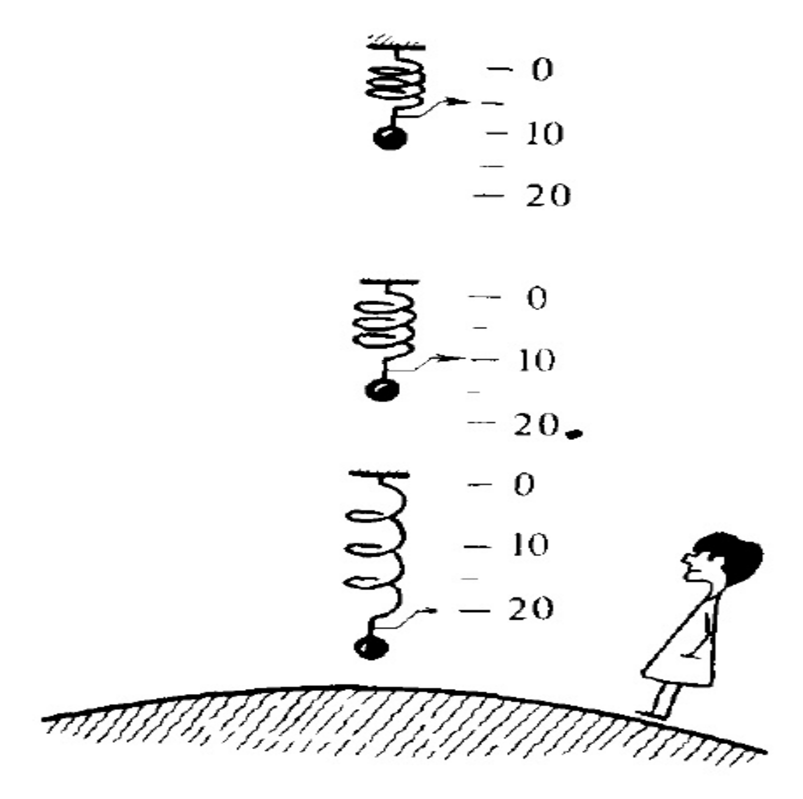
El hecho de que las fuerzas gravitacionales, hablando en general, son mucho más débiles que las eléctricas da lugar a un "reparto" *sui géneris* de las esferas de influencia de estas fuerzas. Por ejemplo, al calcular que en los átomos la atracción gravitacional de los electrones hacia el núcleo es 1 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 veces más débil que la eléctrica, no es difícil comprender que los procesos en el seno del átomo vienen determinados, prác-

ticamente, tan sólo por las fuerzas eléctricas (si, por momento, dejamos a un lado los procesos intranucleares). Las fuerzas gravitacionales llegan a ser tangibles y, a veces, también grandiosas, cuando en las tablas aparecen masas tan enormes como las de los cuerpos cósmicos: planetas, estrellas, etc. Así, por ejemplo, la Tierra y la Luna se atraen con una fuerza aproximadamente igual a 20 000 000 000 000 000 toneladas. Incluso las estrellas tan alejadas de nosotros, cuya luz necesita años para alcanzar la Tierra, nos envían su saludo gravitacional que encuentra su expresión en un imponente: son centenares de millones de toneladas.

El radio de su acción es igual a la infinidad

De hecho, ya hemos admitido tácitamente que la atracción recíproca de dos cuerpos disminuye a medida que éstos se alejan uno del otro. Es una cosa tan palmaria y parece tan evidente que raras veces alguien deja que le surjan dudas al respecto. No obstante, vamos a probar realizar mentalmente el siguiente experimento: mediremos la fuerza con la cual la Tierra atrae algún cuerpo, por ejemplo, una pesa de 20 kilogramos. Sea que el primer experimento corresponda a las condiciones en que la pesa está situada a una distancia muy grande de la Tierra. En estas condiciones la fuerza de atracción (la cual, a propósito, puede medirse con una balanza de muelle, la más común y corriente) prácticamente será igual a cero. A medida que la pesa irá aproximándose a la Tierra aparecerá e irá creciendo paulatinamente la atracción mutua, y, por fin, cuando la pesa se encontrará ya en la superficie de nuestro planeta la aguja de la balanza de muelle se detendrá en la división

"20 kilogramos", por cuanto aquello que llamamos peso, abstrayéndonos de la rotación de la Tierra, no es sino la fuerza con la cual la Tierra atrae los cuerpos dispuestos en su superficie. Ahora bien, ¿y si prolongamos nuestro experimento bajando la pesa en una mina profunda? Es fácil percatarse de que semejante proceder disminuirá la fuerza que actúa sobre la pesa. Lo expuesto queda claro aunque sea por el hecho de que en el caso de que nosotros, al continuar nuestro experimento imaginario, hubiéramos colocado la pesa en el centro de la Tierra, la atracción por todos los lados se compensaría recíprocamente y la aguja de balanza de muelle se encontraría exactamente en el cero. Así, pues, resulta que no se puede decir simplemente que las fuerzas gravitacionales decrecen con el aumento de la distancia: siempre se debe estipular que, con esta formulación, dichas distancias, de por sí, se toman mucho mayores que las dimensiones de los cuerpos. Precisamente en caso resulta



válida la ley formulada por Newton: *las fuerzas de la gravitación universal disminuyen inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre los cuerpos que atraen*. Tratemos de representarnos más claramente qué significa este enunciado. Desde el punto de vista aritmético esto significa que si, por ejemplo, la distancia aumenta tres veces, entonces, la fuerza disminuye 3^2 veces, es decir nueve veces, etc. Sin embargo, este cálculo no esclarece todavía si esta variación en función de la distancia es rápida o no muy rápida. ¿Es que semejante ley significa que la interacción se deja sentir, prácticamente, tan sólo entre los vecinos más íntimos, o bien, se nota también a distancias bastante grandes?

A lo mejor, la forma más adecuada para responder a esta pregunta es comparar la ley de disminución de las fuerzas gravitacionales en función de la distancia con la ley conforme a la cual decrece la iluminación a medida que se aleja de la fuente. Resulta que tanto en el primero, como en el segundo caso actúa una misma ley: la de proporcionalidad inversa al cuadrado de la distancia. ¡Pero sí vemos las estrellas separadas de nosotros por distancias tan enormes que hasta el rayo luminoso, el cual no tiene rivales cuando se trata de la velocidad, puede salvarlas tan sólo en miles de millones de años! Y si, a pesar de todo, la luz de éstas llega hacia nosotros, esto significa que (pues la ley de decrecimiento es la misma) debe percibirse, aunque en un grado muy débil, su atracción. Por consiguiente, la acción de las fuerzas de la gravitación universal se extiende, decreciendo de una forma continua, a distancias prácticamente ilimitadas. Como dicen los físicos, el radio de su acción es igual a la infinidad. *Las fuerzas gravitacionales son las de acción de largo alcance*. Tal es el "nombre oficial" de estas

fuerzas en la física. Como veremos más adelante, muchas fuerzas están lejos de tener semejante carácter. A consecuencia de su largo alcance la gravitación liga todos los cuerpos del Universo.

La relativa lentitud con que las fuerzas disminuyen con la distancia en nuestras condiciones terrestres se manifiesta a cada paso: es que los cuerpos, en su totalidad, una vez trasladados de una altura a otra, no cambian su peso (o bien, si queremos ser más precisos, lo cambian pero en un grado sumamente insignificante) justamente porque con una variación relativamente pequeña de la distancia —en el caso dado, hasta el centro de la Tierra— las fuerzas gravitacionales, en la práctica, no varían.

A propósito, cabe señalar que precisamente por esta causa la ley de la variación de las fuerzas gravitacionales en función de la distancia fue descubierta en el "cielo". En este caso, todos los datos necesarios se sacaron de la astronomía. Sin embargo, no conviene pensar que la disminución de la fuerza de la gravedad con la altura no puede descubrirse en las condiciones terrestres. Así, por ejemplo, un reloj dotado de péndulo con el período de oscilación de un segundo se atrasará durante 24 horas casi en tres segundos si se le eleva del sótano al piso superior de la Universidad de Moscú (o sea, a la altura 200 metros), con la particularidad de que este atraso se produce tan sólo a costa de la disminución de la fuerza de la gravedad.

Las alturas en que se mueven los satélites artificiales de la Tierra ya son comparables con el radio de nuestro planeta, de modo que para el cálculo de sus trayectorias es absolutamente indispensable tener en cuenta la variación de la fuerza de la atracción terrestre con la distancia.

Una propiedad insólita de las fuerzas de gravitación

Durante muchos siglos la ciencia medieval tomaba como un dogma inconmovible la afirmación de Aristóteles acerca de que un cuerpo cae con tanta mayor velocidad cuanto mayor es su peso. Y lo confirma incluso nuestra experiencia cotidiana, pues se conoce que una plumilla cae más lentamente que una piedra. Sin embargo, como lo supo demostrar por primera vez Galileo, aquí todo el asunto reside en que la resistencia del aire, al entrar en juego, desfigura de un modo radical el cuadro que se presentaría, si sobre todos los cuerpos actuase únicamente la sola atracción terrestre. Existe un experimento extraordinario por su carácter patente con el llamado tubo de Newton que permite de una manera muy sencilla evaluar el papel que pertenece a la resistencia del aire. He aquí una breve descripción de este experimento. Figúrense un ordinario tubo de vidrio (para que se vea lo que se opera en su interior) en que están colocados diferentes objetos: perdigones, pedacitos de corcho, plumillas, etc. Si el tubo se pone en una posición tal que todos estos objetos pueden caer, entonces, los que más raudos pasarán serán los perdigones, les seguirán los pedacitos de corcho y, por fin, descenderán suavemente las plumillas. Pero trataremos de observar la caída de los mismos objetos cuando del tubo se ha bombeado el aire. La plumilla, perdiendo su anterior lentitud, precipita rápidamente sin atrasarse de los perdigones y el corcho. Por consiguiente, antes, su movimiento se frenaba por la resistencia del aire, resistencia que, en menor grado, afectaba el movimiento del corcho y, en un grado todavía menor, influía en el movimiento de los perdigones. Por lo tanto, si no fuera

por la resistencia del aire, si sobre todos los cuerpos sólo actuasen las fuerzas de la gravitación universal —en el caso particular, las de la atracción terrestre—, todos los cuerpos caerían de una manera completamente idéntica, acelerándose a un mismo ritmo.

Pero, "no hay nada nuevo bajo la Luna". Hace dos mil años Lucrecio Caro en su famoso poema "Sobre la naturaleza de las cosas" escribía:

...Todo aquello que cae inmerso en el aire enrarecido
Lo debe hacer con mayor rapidez, acorde con su propio peso,
y esto resulta así porque del agua o aire la esencia fina
Es incapaz de impedir, en medida igual, el caer de las cosas,
Cediendo, primero, ante aquellas que tienen el peso más grande.
Por el contrario, nunca, jamás, es capaz el vacío
Cosa alguna frenar, presentándose como apoyo,
pues esencia misma siempre le hace ceder,
Cualquiera que sea el respectivo objeto.
Deben por esto las cosas, cuando libres descienden en el vacío,
Ser igual de veloz, aunque sea distinto su peso.

Por supuesto, estas admirables palabras no eran sino una hermosa conjetura. Para convertir esta conjetura en una ley seguramente establecida se necesitaron muchos experimentos comenzando por los famosos ensayos de Galileo quien estudiaba la caída desde la torre inclinada de Pisa de bolas de iguales dimensiones, pero hechos de distintos materiales (mármol, madera, plomo, etc.) y terminando con las complejísimas medi-

ciones modernas de la influencia que la gravitación ejerce la luz. Toda esta diversidad de los datos experimentales nos afianza con insistencia en la convicción que las fuerzas gravitacionales comunican a todos los cuerpos una misma aceleración; en particular, la aceleración de la caída libre (aceleración de la gravedad) originada por la atracción terrestre es igual para todos los cuerpos y no depende ni de la composición, ni de la estructura, ni de la masa de los propios cuerpos.



Repetimos, esta ley, al parecer sencilla, es la que expresa, por supuesto, tal vez la más maravillosa particularidad de las fuerzas gravitacionales. Lisa y llanamente, no existen otras fuerzas cualesquiera que aceleren en igual medida



todos los cuerpos independientemente de su masa. He aquí, por ejemplo, un futbolista que golpeó el balón. Cuanto más ligero sea el balón tanta mayor velocidad adquirirá (siendo iguales la fuerza y la duración del tiro). Bueno, ¿y qué diría el lector sobre el futbolista cuyo "chut" aceleraría en igual grado tanto un ordinario balón de cuero, como, por ejemplo, una pesa de treinta kilogramos o incluso al elefante? Quienquiera dirá que semejante cosa es absolutamente inverosímil. Pero es que precisamente así se desarrollan los asuntos cuando se trata de las acciones gravitacionales, con la única diferencia, solamente, de que el "golpe" gravitacional, si se puede decir así, dura permanentemente y nunca cesa.

Al discutir el problema sobre la naturaleza de la gravitación y sobre aquello que lleva el nombre de teoría general de la relatividad hablaremos aún mucho acerca de cuán profundo sentido físico se oculta tras la mencionada particularidad admirable de las fuerzas gravitacionales. Y ahora tenemos que recordar qué forma la base de la descripción del movimiento en la mecánica. En su tiempo, al referirnos a la definición de la fuerza en la mecánica, nos vimos obligados a apoyarnos en las leyes newtonianas de la mecánica de acuerdo con las cuales la aceleración comunicada al cuerpo es directamente proporcional a la fuerza que sobre éste actúa e inversamente proporcional a la masa del cuerpo. Esto conduce a una sencilla y magnífica deducción: para que la aceleración no dependa de la masa es necesario que la fuerza sea proporcional a la masa. He aquí, por ejemplo, dos cuerpos: una pelota para ping-pong y una bolita de plomo de igual tamaño. La masa de la primera es, aproximadamente, 300 veces menor que la de la segunda. Por consiguiente, para comunicar a



la bolita de plomo la misma aceleración que a la pelota es necesario actuar sobre esta bolita con una fuerza trescientas veces mayor. Sin embargo, por influjo de la atracción terrestre tanto la pelota, como la bolita caen con una aceleración precisamente igual. En consecuencia, esta atracción está regulada en correspondencia con las masas de los cuerpos: cuantas veces la masa de la bolita de plomo es mayor que la masa de la pelota, tantas veces es mayor su atracción a la Tierra.

Así, pues, la propiedad remarcable de las fuerzas de la gravitación universal puede comprimirse en un conciso enunciado: *la fuerza gravitacional a la masa de los cuerpos*. Recalquemos que aquí se trata de aquella misma masa que en las leyes de Newton interviene como medida de la inercia. A veces, la llaman incluso masa inerte.

En estas pocas palabras: "la fuerza gravitacional es proporcional a la masa" está encerrado un sentido admirablemente profundo. Cuerpos grandes y pequeños, calientes y fríos, de la más diversa composición química y de cualquier estructura, todos ellos experimenten una misma interacción gravitacional, si sus masas son iguales.

¿Y si, por cierta razón, esta ley, efectivamente es simple? Es que Galileo, por ejemplo, la consideraba casi axiomática. He aquí sus razonamientos. Supongamos que caen dos cuerpos de peso diferente. Según Aristóteles, el cuerpo pesado debe caer más rápidamente incluso en el vacío. Ahora uniremos los cuerpos. Entonces, por una parte, los cuerpos deben caer con mayor velocidad ya que el peso total aumentó. Pero, por otra parte, la añadidura de un fragmento que cae más lentamente al cuerpo pesado tiene que retardar dicho cuerpo. Nos enfrentamos con una contradicción la cual se puede eliminar únicamente si admitimos que todos los cuerpos, por acción tan sólo de la atracción terrestre, caen con misma aceleración.

¡Al parecer, todo es lógico! Sin embargo, analicemos otra vez el mencionado razonamiento. Éste descansa en el método difundido de demostración por reducción al absurdo: suponiendo que el cuerpo más pesado cae más rápidamente que el ligero llegamos a una contradicción. Fíjense: desde el comienzo surgió la suposición de que la aceleración de la caída libre viene determinada por el *peso* y solamente por el *peso*. (Estrictamente hablando, no por el peso, sino por la masa.)

No obstante, con anterioridad (es decir, antes del experimento) este hecho no es evidente, de ningún modo. ¿Y qué sería si la aceleración en cuestión se hubiera determinado por el volumen de los cuerpos? ¿O por la temperatura? ¿O bien,

finalmente (demos rienda suelta a nuestra fantasía), por el color o el olor? Hablando brevemente, figurémonos que existe una carga gravitacional análoga a la eléctrica y, como esta última, no ligada absolutamente, de una forma directa, con la masa. La comparación con la carga eléctrica es muy útil. He aquí dos granitos de polvo que se encuentran entre las placas cargadas de un condensador. Supongamos que estos granitos de polvo tienen cargas iguales, mientras que sus masas se relacionan como 1 : 2. En este caso sus aceleraciones deben diferenciarse dos veces: las fuerzas determinadas por las cargas son iguales, y para las fuerzas iguales el cuerpo con la masa doble se acelera dos veces menos. Ahora bien, si unimos las motas de polvo, entonces, evidentemente, la aceleración tendrá un nuevo valor, valor intermedio. Aquí, nada nos puede ofrecer cualquiera que sea enfoque especulativo exactamente análogo si la carga gravitacional no estuviese ligada con la masa. Y la respuesta a la pregunta de si existe semejante enlace la puede dar tan sólo la experiencia. Ahora ya comprendemos que precisamente los experimentos que demostraron el carácter idéntico para todos los cuerpos de la aceleración debida a la gravitación, estos experimentos, en esencia, pusieron de manifiesto que la carga gravitacional (masa gravitacional o gravitatoria) es igual a la masa inerte.

La experiencia, y solamente la experiencia, puede servir tanto de fundamento para leyes físicas, como de criterio de su validez. Recordemos, aunque sea, los experimentos récord en cuanto a su precisión efectuados bajo la dirección de V.B. Braguinski en la Universidad Estatal de Moscú. Dichos experimentos en los cuales fue obtenida una exactitud del orden de 10^{-12}

confirmaron una vez más la igualdad de las masas gravitacional e inerte.

Precisamente en la experiencia, en el amplio ensayo de la naturaleza —desde el reducido ámbito del modesto laboratorio de un científico hasta la grandiosa escala cósmica— se basa la ley de la gravitación universal la cual (si hacemos el balance de todo lo expuesto con anterioridad) dice:

La fuerza de la atracción mutua de cualesquiera dos cuerpos cuyas dimensiones son mucho menores que la distancia que les separa es proporcional al producto de las masas de estos cuerpos e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre ellos.

El coeficiente de proporcionalidad lleva el nombre de constante gravitacional o constante de gravitación. Si medimos la longitud en centímetros, el tiempo en segundos y la masa en gramos, la constante gravitacional, en cifras redondeadas, será igual a $6{,}673 \cdot 10^{-8}$, con la particularidad de que su dimensión será, respectivamente, $cm^3/g \cdot s^2$.

3. Gravitación en acción

El sistema solar

La llegada a la ciencia de las palabras "mecánica celeste" que hoy en día suenan un poco a la antigua, no era casual. Fue en los objetos celestes donde por primera vez se sometía a prueba la ley de la gravitación universal. Precisamente la mágica armonía de la ley matemática única que rige el movimiento de los planetas en su sempiterna rotación alrededor del Sol, atrajo a la teoría newtoniana, con una fuerza irresistible, a los físicos, a los astrónomos y,

en general, a todos los investigadores de la naturaleza.

Con la investigación del movimiento de los planetas está relacionado uno de los más grandes triunfos de las ciencias naturales: la predicción por el científico francés Leverrier y el inglés Adams de un nuevo planeta, Neptuno. Las pequeñas desviaciones en el movimiento de Urano por su órbita respecto a los valores calculados a base de la teoría de Newton se explicaron por perturbación que Urano experimentaba por parte de un nuevo planeta desconocido. Se calculó la órbita de este último, y en cuanto los astrónomos dirigieron sus telescopios al sector indicado del firmamento, inmediatamente el nuevo planeta fue descubierto.

Hasta la fecha la gravitación universal permanece en nuestra concepción como muelle *principal del movimiento de los cuerpos cósmicos.*

Puede parecer extraño por qué las fuerzas gravitacionales, tan despreciablemente pequeñas durante la interacción de los objetos que nos rodean, adquieren una importancia tan decisiva cuando se trata de la escala cósmica.

Ya.I. Perelman lo pone en claro de una forma muy patente. Las masas de los cuerpos celestes son, indiscutiblemente, enormes. Pero resulta que también son colosales las distancias entre estos cuerpos. Como es sabido, sin embargo, la fuerza gravitacional es proporcional al producto de las masas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre éstas. Ahora bien, la masa del cuerpo es proporcional a su volumen y, por consiguiente, es proporcional al cubo de las dimensiones lineales. Por esta razón, si las dimensiones de los cuerpos y su alejamiento aumentan n veces, la fuerza gravitacional ¡crecerá $\frac{n^3 \cdot n^3}{n^2} = n^4$ veces! Esto significa

que si todas las dimensiones en el Universo aumentan, digamos, 2 veces, las fuerzas de gravitación en éste ¡incrementarán 16 veces! He aquí la causa de que la atracción de las masas cósmicas a grandes distancias es incomparablemente más importante que la de los cuerpos pequeños que se encuentran unos junto a otros.

Ya hace mucho que se convirtió en acostumbrado y corriente el hecho de que en todos los calendarios se indican las fases de la Luna, así como la fecha y el carácter de los eclipses de la Luna y del Sol. Los astrónomos publican tablas de extraordinaria exactitud señalando con muchos años de antelación en qué punto del firmamento y en qué instante de tiempo deben encontrarse los planetas. Se vaticina con gran precisión la aparición en el cielo de muchos cometas ("estrellas con cola" como éstos llamaban antes) que en todas las direcciones atraviesan el sistema solar.

El origen de los planetas

Puede parecer que conocemos todo referente al movimiento de los planetas de nuestro sistema solar. Sin embargo, los asuntos están lejos de presentarse así. Es que este sistema apareció en cierto tiempo, iba evolucionando y sigue transformándose también en la actualidad. El mismo tiene una edad determinada. Aquella invariabilidad y estabilidad que nuestro sistema planetario exhibe en el curso de muchos siglos se explica tan sólo porque los hombres lo observan durante un intervalo de tiempo relativamente pequeño para su edad. En efecto, incluso si observamos a un hombre durante, digamos, una décima fracción de segundo, puede formarse la impresión de que tenemos ante nosotros un sistema completamente estable.

¿Pero qué se puede decir acerca del pasado de nuestro sistema solar? Esta cuestión, desde tiempos muy remotos, preocupaba las mentes de los hombres de ciencia. Se promovían numerosas hipótesis y se hacían aún más numerosas conjeturas. Entre estas hipótesis y conjeturas hay ingenuas, hay poéticas y también hay francamente fantásticas.

No hablaremos sobre las numerosas conjeturas referentes al período preneutoniano. En la mayoría de los casos éstas no eran científicas en el sentido moderno de esta palabra.

En primer término: ¿de dónde se sacaba el material de construcción para el sistema solar? Más exactamente, se trata del material de construcción para los planetas, por cuanto la mayoría de los investigadores coinciden con bastante unanimidad en que el Sol es más viejo que sus satélites*.

Desde hace mucho entre los investigadores se llevan discusiones sobre el particular. Aquí se promovían dos hipótesis principales, cada una de éstas tiene sus ardientes partidarios, y el plato de la balanza se inclinaba alternativamente ora para un lado, ora para el otro, de modo que por ahora es todavía difícil tomar una decisión definitiva.

Es ampliamente conocida la hipótesis de Kant — Laplace que en un tiempo parecía casi evidente y de acuerdo con la cual la materia que formó los planetas no es sino enormes sal-

* El problema sobre el nacimiento de las estrellas en particular, del Sol, reviste un enorme interés independiente. Sin embargo, este problema dista mucho de estar resuelto, y aquí no lo tocaremos. Más tarde, en los capítulos dedicados a las fuerzas nucleares y las interacciones débiles, nos encontraremos con algunas observaciones respecto a los procesos operados en las estrellas.

picaduras incandescentes arrojadas de la superficie del Sol debido a la rotación.

En la variante moderna de esta idea el material de construcción de los planetas apareció simultáneamente con el Sol, separándose de este astro en el proceso de formación del Sol a partir de una condensación (una nube) de gas y polvo interestelar. Así, por ejemplo, el académico V.G. Fesenkov escribe: "Sin tener tiempo para estructurarse en una estrella, es decir, al seguir reduciéndose con intensidad, el Sol tuvo que dejar en el plano ecuatorial, aproximadamente, una cantidad considerable de materia la cual, debido a la exorbitante velocidad de rotación, no pudo concentrarse en un cuerpo único". En este proceso un papel sustancial lo desempeñaban los campos magnéticos y la radiación corpuscular del Sol.

Opuesta a la primera es la hipótesis de captura, o sea, la suposición de que el material de construcción para los planetas llegó del espacio interestelar. Y el papel del Sol se reducía tan sólo a captar y retener este material. Esta idea la formuló, por primera vez, con precisión, el admirable matemático, investigador polar, geógrafo, astrónomo y geofísico —a esta lista todavía se le podría añadir más que una especialidad—, hombre de extraordinaria erudición enciclopédica, Héroe de la Unión Soviética, académico Otto Yulievich Schmidt.

Por ahora no se puede hacer una elección definitiva entre estas hipótesis básicas, aunque la mayoría de los astrónomos consideran más probable la última. Cabe señalar otra cosa: a pesar de la sustancial diferencia entre la teoría de la captura y la de la formación conjunta, o de flujo, éstas tienen mucho en común. A continuación, hablaremos, precisamente, sobre estos momentos comunes.

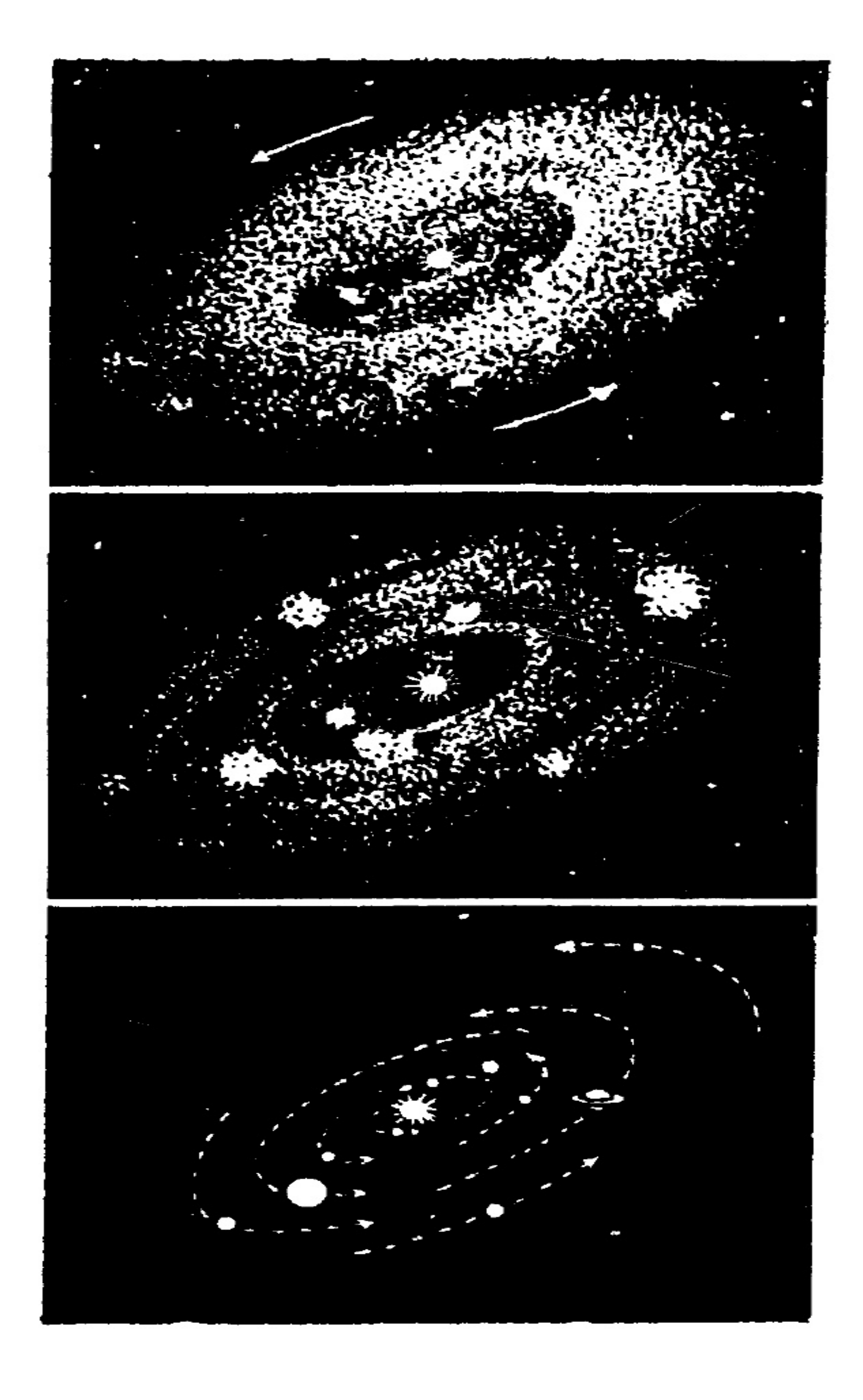
Cualquiera que sea el origen de la materia prima para los planetas dicha materia tenía que pasar, además, por una larga cadena de transformaciones, la cual, en fin de cuentas, condujo al estado actual del sistema solar.

¿Que cuadro, entonces, se debe tomar por inicial? A lo mejor, precedía a la aparición de los planetas una gigantesca nube de gas y polvo que giraba alrededor del Sol. Esta suposición concuerda completamente con ambas hipótesis.

Así, pues, una nube gigantesca

Su destino ulterior se determinaba, fundamentalmente, por tres circunstancias: por la interacción gravitacional de las partículas con el Sol y de unas con otras: por el choque de las partículas y, finalmente, por la acción de la radiación solar. Se sobreentiende que también debe tomarse en consideración el hecho de la rotación. La teoría del origen del sistema solar de O.Yu. Schmidt, de sus discípulos y colaboradores (aquí ya podemos hablar no simplemente sobre una hipótesis, sino ya sobre una teoría, justamente) sigue la evolución de la nube circunsolar hasta la formación de los planetas. Si exponemos con palabras aquello que dicen las complejas fórmulas, instrumento que manejan los científicos, obtendremos el siguiente cuadro.

En el curso de millones de años el aspecto de la nube se transforma de una manera asombrosa. Lenta y paulatinamente ésta comienza a aplanarse convirtiéndose en un disco lenticular en rotación. Las distancias entre las partículas disminuyen y las fuerzas de atracción se acrecientan. Debido a esta causa se producen numerosas condensaciones. Se inicia la llamada condensación gravitacional de la materia. Es un



proceso análogo a la formación de las gotitas de niebla a partir del vapor de agua. Pero aquí, a diferencia de aquél, no actúan las fuerzas moleculares, sino las gravitacionales.

Transitan otras largas retahílas de milenios, y las colisiones de las partículas en la condensación de polvo dan lugar a la formación de cuerpos macizos de decenas o de centenares kilómetros de tamaño. Así, en el disco se forma una enorme cantidad de cuerpos relativamente grandes parecidos a los pequeños planetas asteroides que llenan el espacio entre Marte y Júpiter.

Al moverse alrededor del Sol durante miles de millones de años estos cuerpos chocaban entre sí, fraccionándose o incorporando en su seno cuerpos más pequeños y fragmentos de los grandes.

Los cuerpos que lograron evitar el fraccionamiento comenzaron a crecer con mayor rapidez que los demás, "extrayendo" la materia diseminada en el espacio. Como llegaban a aumentar cada vez más su tamaño, atraían con mayor fuerza y capturaban las partículas circundantes. Pero se necesitaron intervalos cósmicos de tiempo para que este proceso de condensación se consumase y donde se encontraban innumerables moles disformes apareciesen planetas: desde el comienzo de este proceso pasaron cerca de 5 *mil millones* de años.

Solamente cerca del planeta más pesado —Júpiter— su fuerte acción perturbadora no permitió a las moles aglomerarse en un conjunto íntegro. Y hasta el día de hoy tenemos aquí el anillo de los asteroides.

La teoría de Schmidt nos acercó a la comprensión de muchas regularidades en la estructura del sistema solar. Las principales de estas regularidades son las siguientes. Las raíces cuadradas de los radios de las órbitas incrementan, aproximada-

mente, en progresión aritmética (ley de las distancias planetarias); las órbitas son muy próximas a las circulares: son elipses poco alargadas; los planos de las órbitas están inclinados poco unos respecto a otros y respecto al plano ecuatorial del Sol. De la teoría se desprende que todos los planetas deben moverse alrededor del Sol en una misma dirección y que todos los planetas (a excepción de Venus y Urano) giran en un mismo sentido alrededor de sus ejes.

Finalmente, la teoría da la posibilidad de obtener una distribución muy cercana a la real de las masas y las densidades de los objetos del sistema solar.

Simultáneamente con el crecimiento de los planetas la gravitación debe comprimirlos cada vez con mayor fuerza, engendrando presiones colosales. Con ello, comienza el calentamiento de los planetas. Sin embargo, la alta temperatura de las profundidades de la Tierra se explica no sólo como resultado del propio proceso de formación de la Tierra y de la redistribución sucesiva de la materia en ésta. La acumulación del calor que se libera durante la desintegración de los elementos radiactivos (del uranio, torio, radio, etc.) también convertía poco a poco la Tierra en un gigantesco crisol en el cual, bajo presión, se "cocían" nuevos minerales y nacían los materiales que, después de su extrusión a la superficie y el enfriamiento, vistieron la Tierra con su corteza.

Pero con lo expuesto no ponemos todavía punto final al tema. Cuando al principio de la evolución del sistema solar las partículas de polvo se aglomeraron en un disco plano, este disco se convirtió en no transparente. Por esta razón, los rayos solares dejaron de penetrar en la periferia del disco. Allí comenzó a reinar el frío cósmico. La temperatura descendió hasta —270 C°.

Al mismo tiempo, las partes del disco adjuntas al Sol se calentaban intensamente con sus rayos.

Como resultado, cerca del Sol se quedaron, preferentemente, partículas con bajo punto de fundición, mientras que los gases, en primer lugar, el hidrógeno y el helio, se congelaban en la parte fría del disco, en su periferia. En consecuencia, los planetas alejados considerablemente del Sol —Júpiter y Saturno— deben componerse, principalmente, de hidrógeno y helio.

En cambio, los planetas más próximos al Sol, incluyendo la Tierra, deben componerse de sustancias con un punto alto de fundición. Se podría pensar que Urado, Neptuno y Plutón contienen todavía más hidrógeno que Saturno y Júpiter, pero no es así. El proceso de formación de coágulos en el interior de la nube de polvo en la periferia del sistema solar transcurría de una manera retardada, puesto que allí la densidad de la materia fue pequeña. El surgimiento de los numerosos cuerpos asteroidales en las cercanías del Sol aumentó la transparencia de la nube para el momento en que en la zona lejana este proceso todavía no se desarrolló. En estas condiciones los rayos solares provocaron una completa evaporación del hidrógeno a partir de las partículas de polvo y de las superficies de los fragmentos relativamente grandes. Esta circunstancia, precisamente, disminuyó el contenido de hidrógeno en los lejanos planetas.

Todo lo expuesto deriva de la teoría. Bueno, ¿y qué dice la experiencia? ¿Confirma ésta o no las deducciones de los científicos? Claro que no es fácil extraer la "muestra del suelo" de Júpiter. Esta hora no ha llegado todavía. Pero, se puede recurrir a otro procedimiento. Si se conocen la masa y las dimensiones del planeta, es posible evaluar qué elementos químicos contiene. El cálculo demuestra que Júpiter contiene cerca de

85% de hidrógeno, y Saturno, 80% de hidrógeno y 18% de helio. El balance es como sigue: sí, las deducciones de la teoría son certeras, y los lejanos planetas gigantes, en efecto, constan de elementos ligeros, por excelencia, de hidrógeno.

Ahora bien, no quisiéramos que al lector se le dé la impresión de que todo está claro y no ha quedado problema alguno. Por supuesto, muchas cosas llegaron a ser más comprensibles, pero, ¡cuántos enigmas todavía siguen en pie! Y no se trata solamente de ciertas particularidades, sino que esto atañe a los momentos de sumo principio. Recuérdense aunque sea la propia cuestión sobre la prehistoria de nuestro sistema planetario. De conformidad con las observaciones la parte leonina de la masa del sistema solar está concentrada en el propio Sol, el 99,87%, en cambio, el momento de rotación del Sol alrededor de su eje constituye nada más que el 2% del de todo el sistema. Partiendo de la teoría de Schmidt no es difícil obtener semejante distribución de los momentos, pero, en este caso, la nube capturada por el Sol ya debía tener un enorme momento de rotación. Y la pregunta de si la nube capturada ya tenía este momento es lícita y fundamentada.

Los interrogantes quedan, y, además, no son pocos. La propia teoría de Schmidt, hoy en día, no es comúnmente admitida. Sin cesar se promueven cada vez nuevas hipótesis...

La gravitación en la Tierra

Y ahora abordemos el tema conocido por todo el mundo. La atracción hacia la Tierra ... Hay que ser poeta para incluso aquí experimentar la sensación de la novedad. Antoine de Saint-Exupéry, piloto y poeta francés, hizo el aterrizaje de emergencia en el desierto africano y des-

pertó en una cresta con el rostro vuelto hacia las estrellas. "No comprendía aún qué profundidades se abrían ante mis ojos, y faltaba de una raíz a que agarrarme, de un techo, de una rama de árbol entre estas profundidades y mi cuerpo, me sentí embargado por un vértigo, sentí que caía precipitadamente, sumergiéndome en el abismo.

Pero no, no caía. De la nuca a los talones estaba ligado a la tierra. Me entregué a ella con todo mi peso y sentí entonces cómo me llena una quietud. La gravitación me pareció soberana como el amor.

Experimenté la sensación de que tierra me sostenía, me prestaba apoyo, me subía y me llevaba al espacio nocturno. Descubrí que el peso de mi cuerpo me apretaba contra el planeta, a semejanza de aquel peso que en los virajes nos aprieta contra el carro; yo gozaba de este admirable apoyo, de su solidez, de su seguridad, adivinando bajo mi cuerpo la cubierta curvada de mi navío...

Percibía con mis espaldas esta gravedad, tan armoniosa y constante, siempre igual en la eternidad. Sí, yo estaba ligado a mi entrañable tierra".

Sí, tan sólo gracias a su atracción la Tierra llegó a ser Madre para nosotros.

Cuando se reflexiona profundamente sobre el papel que las fuerzas de la gravedad desempeñan en la vida de nuestro planeta, se abren ante nuestra vista océanos enteros. Y no solamente océanos de fenómenos, sino también océanos en el sentido literal de esta palabra. Piélagos de agua. Piélagos de aire. Ninguno de éstos podría existir sin la gravitación.

La ola en el mar, el movimiento de cada gota de agua en los ríos que alimentan este mar, todas las corrientes, todos los vientos y las nu-

bes, todo el clima del planeta vienen determinados por el juego de dos factores básicos: la actividad solar y la atracción terrestre.

La atracción no sólo retiene en la Tierra a las personas, a los animales, el agua y el aire, sino también los comprime. Junto a la superficie de la Tierra esta compresión está lejos de ser muy grande, sin embargo su papel es bastante importante.

Un barco navega por el mar. ¿Qué es lo que le impide irse a pique?Todo el mundo lo conoce. Es la famosa fuerza de empuje del agua descubierta por Arquímedes. Ahora bien, esta fuerza debe su aparición tan sólo a que el agua está comprimida por la gravedad con una fuerza que se acrecienta a medida que aumenta la profundidad. En el interior de una nave cósmica en vuelo no hay fuerza de empuje, de la misma manera que tampoco hay peso.

El propio globo terráqueo está comprimido por las fuerzas gravitacionales hasta presiones ingentes. Por lo visto, en el centro de la Tierra la *presión supera 3 millones de atmósferas.*

Por impacto de las fuerzas de presión que actúan durante un período prolongado, todas las sustancias que estamos acostumbrados a considerar sólidas, se comportan en estas condiciones a semejanza de alquitrán o resina. Los materiales pesados descienden al fondo (si se puede llamar así el centro de la Tierra) y los ligeros emergen. Este proceso dura miles de millones de años. Y *como se desprende de la teoría de Schmidt* tampoco ha terminado ahora. La concentración de los elementos pesados en la zona del centro de la Tierra lentamente se acrecienta.

Bueno, ¿y cómo se *manifiesta* aquí, en *nuestra* Tierra, la atracción del Sol y del cuerpo celeste más próximo que es la Luna? Esta atracción la pueden observar sin instrumentos especiales solamente los habitantes de las costas oceánicas.

El Sol actúa de una manera casi igual sobre todo lo que se encuentra tanto en la Tierra, como en su interior. La fuerza con que el Sol



atrae, por ejemplo, a un moscovita en la hora del mediodía, cuando éste está más cerca de nuestro Astro, casi no se diferencia de la que actúa sobre él en la medianoche. Es que la distancia desde la Tierra hasta el Sol supera diez mil veces el diámetro terrestre, y el aumento de esta distancia en una diezmilésima cuando la Tierra de media vuelta alrededor de su eje, prácticamente, no varía la fuerza de atracción.

Ésta es la razón de que el Sol comunica aceleraciones casi iguales a todas las partes del

globo terráqueo y a todos los cuerpos en su superficie.

Casi iguales, pero no del todo idénticas. Precisamente debido a esta pequeña diferencia en el océano surgen las mareas.

En la parte de la superficie terrestre vuelta hacia el Sol la fuerza de atracción es algo mayor que es necesario para el movimiento de esta parte por la órbita elíptica, mientras que en la parte opuesta de la Tierra la misma es algo menor. Como resultado, de acuerdo con las leyes de la mecánica de Newton, el agua en el océano se infla en la dirección vuelta al Sol, y en el lado opuesto retrocede de la superficie de la Tierra. Se originan las llamadas fuerzas formadoras de mareas, las cuales dilatan el globo terráqueo y, hablando a grandes rasgos, dan a la superficie de los océanos la forma de elipsoide.

Cuanto menores son las distancias entre los cuerpos en interacción tanto mayores son las fuerzas que originan las mareas. Ésta es la causa de que la Luna ejerce mayor influencia en la forma del océano mundial que el Sol. Más exactamente, la acción de las mareas se determina por la relación entre la masa del cuerpo y el cubo de su distancia a la Tierra; y para la Luna esta relación es, aproximadamente, dos veces mayor que para el Sol.

De no existir la cohesión entre las partículas del globo terráqueo las fuerzas que originan las mareas lo romperían.

Es posible que semejante cosa sucedió con uno de los satélites de Saturno cuando aquél se aproximó a este gran planeta. Probablemente, aquel anillo compuesto de fragmentos que convierte Saturno en el planeta tan peculiar no es otra cosa que los "despojos" del satélite.

Así, pues, la superficie del océano mundial se asemeja al elipsoide cuyo eje mayor está vuel-

to al lado de la Luna. La Tierra gira alrededor de su eje. Por esta causa, por la superficie del océano al encuentro de la dirección de la rotación del planeta se desplaza la ola de marea. Cuando ésta se acerca a la costa comienza el flujo. En algunos lugares el nivel del agua sube hasta 18 metros. Después la ola de marea se va y comienza el reflujo. El nivel del agua en el océano oscila, en término medio, con un período de 12 horas 25 minutos (la mitad del día lunar).

Este cuadro tan simple se deforma considerablemente por la acción simultánea de formación de mareas por el Sol, por rozamiento del agua, la resistencia de los continentes, la configuración complicada de las costas oceánicas y del fondo en las zonas del litoral, así como por algunos otros efectos particulares.

Lo importante es que la onda de marea retarda la rotación de la Tierra.

Por cierto, el efecto es muy pequeño. Durante 100 años el día incrementa en una milésima fracción de segundo. Pero, actuando miles de millones de años, las fuerzas de frenado conducirán a que la Tierra se vuelva a la Luna siempre con el mismo lado y el día terrestre llegue a ser igual al mes lunar. Esta cosa ya ha ocurrido con la Luna. Nuestro satélite está frenado hasta tal punto que todo el tiempo da a la Tierra el mismo hemisferio.

Para "echar un vistazo" al otro lado de la Luna resultó necesario enviar alrededor de ésta una nave cósmica.

Al formular su célebre ley de la gravitación universal, Newton planteó ante la ciencia una pregunta profundísima: ¿qué es la gravitación, cuál es su naturaleza, cómo se transmite la interacción entre las masas gravitatorias?

Lo que hizo Newton fue solamente *describir* la gravitación. Surgió la necesidad de *explicarla*.

Ahora, precisamente, pasaremos a relatar sobre aquello que se logró alcanzar en este ámbito.

4. Geometría y gravitación

Las búsquedas de un intermediario

En una de sus interevenciones el gran científico danés Niels Bohr caracterizó la teoría de los fenómenos electromagnéticos como salida racional fuera de los marcos de la mecánica clásica "que vale para aminorar el contraste entre la acción a distancia y la acción durante el contacto".

Este contraste es todavía más fuerte en el problema de la gravitación universal, aunque sea por el hecho de que aquí, con frecuencia, son enormes las propias distancias.

A lo mejor, no cada persona podrá comprender a fondo el complicado mecanismo de la transmisión del esfuerzo desde la mano por la cadena hacia el cubo que se saca del pozo, pero una cosa queda clara para todo el mundo: si de esta cadena se elimina aunque sea un solo eslabón, se interrumpirá la transmisión de la fuerza de la mano al cubo.

Y las fuerzas gravitacionales, durante largo tiempo, se figuraban precisamente como una especie de cadena asombrosa sin un solo eslabón. En la ciencia esto se denomina acción a distancia, o sea, acción sin entrar en contacto, sin cualesquiera intermediarios.

Cabe decir sin ambages que aunque los físicos, en algunos períodos, "se acostumbraban" a la acción a distancia, encontrándola incluso cómoda, sin embargo, los científicos nunca podían avenirse al hecho de que dos cuerpos eran capaces de arrastrar o empujar uno a otro a través de un espacio absolutamente excento de

algo (o bien —y éste es ya otro polo— lleno de cualquier cosa).

Las búsquedas de un intermediario durante las interacciones gravitacionales comenzaron, de hecho, simultáneamente con la aparición en la ciencia de las primeras conjeturas sobre estas fuerzas. También el propio Newton comprendía con plena claridad toda la profundidad de este problema físico.

Al parecer, lo único que se puede hacer es admirar que Newton, después de dar la formulación cuantitativa de la famosa ley sobre la fuerza de la gravitación universal, como si hubiera renunciado, de una forma recalcada, a buscar el mecanismo de su transmisión (lo que sirvió de motivo para que los numerosos comentaristas lo incluyesen en el campo de los partidarios de la acción a distancia). Desde luego, la expresión "hubiera renunciado" no refleja correctamente el quid de la cuestión. Y este quid reside en las siguientes dos circunstancias.

En primer término, Newton no podía —en virtud, simplemente, del nivel de la ciencia de aquella época— hallar la explicación de la naturaleza de la gravitación. Para este fin se necesitaron avances tan fundamentales de la ciencia como la aparición del concepto de campo, tema que más tarde trataremos con mayor detalle, la creación de la electrodinámica y, finalmente, de la teoría de la relatividad.

La segunda causa no es tan evidente para el investigador de hoy, a pesar de que ésta, a todas luces, también estaba lejos de desempeñar el último papel. Esta causa atañe a la propia comprensión de la ciencia, de sus métodos y sus tareas.

Es posible que muchos estén enterados de la lucha comenzada en el siglo diecisiete entre las concepciones naturalistas cartesiana y newtonia-

na. Rene Descartes (Cartesius), a la par de Gassendi, Bacon de Verulam, Hobbes, Locke y otros relevantes pensadores de su época, supieron hacer —y esto, en primer término, se debe relacionar, tal vez, con el nombre de Descartes— el decisivo paso adelante, divorciándose de la filosofía escolástica reinante en el medievo, con sus tentativas de explicar la naturaleza introduciendo todo tipo posible de "simpatías" y "antipatías" y su idea de finalidad en los fenómenos.

No obstante, por grande que fuera el valor de la nueva escuela con la alianza característica para ésta de la filosofía y las ciencias naturales, cabe reconocer que las ciencias exactas, en el sentido actual de esta palabra, aparecieron muchas veces en la lucha contra esta escuela. Las especulaciones teóricas de Descartes, a pesar de todo su interés sugestivo, estaban exentas de un momento esencial: se encontraban lejos de apoyarse en la experiencia. en cierta medida hasta se contraponían a ésta. Precisamente esta circunstancia dio motivo para la observación irónica de Huygens: "Descartes, por lo visto, tiene, el propósito de resolver todos los problemas de la física, sin preocuparse siquiera si sus razonamientos son correctos o no". En relación con ello es característica la actitud de Descartes respecto a Galileo; el pensador francés reprochaba a este último de aquello que ahora se designa con la palabra "empirismo". Según la opinión de Descartes Galileo no analiza la causa primera de las cosas, investiga tan sólo las bases de algunos fenómenos aislados y, por esta razón, construye sin fundamento.

"Hipotheses non fingo"

Newton seguía el camino de Galileo. Era necesario liberar la ciencia de las ideas no dicta-

das por la propia naturaleza, interrumpir la infinita fila de las hipótesis en el estilo de la filosofía cartesiana y abordar el estudio de las verdaderas leyes de la naturaleza. A continuación citamos al propio Newton:

"Todo aquello que no se desprende de los fenómenos *no es sino una hipótesis.* Y a éstas no hay lugar en la física experimental. En la última se deducen algunas tesis derivadas de los fenómenos observados, generalizándolas por vía de inducción". Como la renuncia a las especulaciones abstractas de la filosofía cartesiana debe comprenderse la máxima de Newton "Hipotheses non fingo", o sea, "no invento hipótesis".

La actitud ostensiblemente negativa de Newton respecto a la "invención de hipótesis" se manifestó también en la cuestión sobre la naturaleza de la gravitación. Sin embargo, sería sumamente erróneo interpretarla como el reconocimiento por él de la idea de acción a distancia. Por lo demás, el propio Newton lo expone con absoluta claridad en la carta a Bentley: "Considero un absurdo admitir que un cuerpo el cual se *encuentra a cierta distancia de otro cuerpo puede* actuar en éste a través del espacio vacío sin ningún intermediario. Debido a ello, la gravedad debe originarse por un agente que actúa continuamente y conforme a leyes determinadas".

La cuestión sobre la naturaleza de este agente quedó sin resolver. Tampoco la resolvieron las subsiguientes discusiones con las cuales estaban relacionados los nombres de los científicos tan eminentes como Juan Bernoulli, Huygens, Leibniz, Daniel Bernoulli, Lomonósov y Euler.

En cierta época estaba en circulación la teoría, bastante ingenuo de los "flujos". De acuerdo con esta teoría, el espacio, en todas las direcciones, se atraviesa por flujos de materia (sin que se precisase la naturaleza de estos flujos). Si se figuran

dos cuerpos dispuestos uno no lejos del otro, éstos parece como si se eclipsaran recíprocamente de dichos flujos. Resulta que por el lado exterior los flujos —y, por consiguiente, también la presión— son mayores que en los lados adjuntos. Con esta diferencia entre las presiones se proponía explicar, justamente, la gravitación universal. Esta explicación, difícilmente, puede considerarse en serio como satisfactoria. La misma no sólo introduce unas hipótesis muy esenciales, sino también conduce, de forma directa, a deducciones que no encajan en cualesquiera marcos experimentales. Semejante suposición, por ejemplo, predice sombras gravitacionales no existentes o el surgimiento del frenado de los planetas que no existe en la realidad, etc.

El buen gusto de la humanidad

El problema de la gravitación otra vez —y ya desde *posiciones nuevas de principio*— fue sometido al examen al cabo de 234 años después del establecimiento definitivo de la ley de la gravitación universal por Newton. Para hacer aquí un nuevo paso resultó necesario revisar las ideas más fundamentales: ideas sobre el espacio y el tiempo. En esencia, avanzar en el entendimiento de la naturaleza de la gravitación significó construir una nueva concepción física del mundo. Y ahora, a posteriori, sólo podemos sorprendernos que este ingente trabajo —que, sin hiperbolizar, fue un viraje cardinal en la física— pudiera llevarse a cabo, prácticamente, por una sola persona. Es verdad que el nombre de esta persona fue Alberto Einstein. A lo mejor, no será una exageración decir que no había otra teoría física alguna que jamás despertara un interés tan acalorado y hasta apasionado en los círculos amplísimos tanto de físicos, como no

de físicos, como la teoría de la relatividad de Einstein. Acerca de esta teoría escribieron no sólo en las revistas y libros científicos. Por los años veinte, no hubo, probablemente, ningún periódico, ninguna revista —incluyendo revistas para niños y las de moda— en que no encontrase repercusión este acontecimiento puramente científico. Por cierto, en aras de la justicia, cabe señalar que el número de aquellos quienes escribían acerca de la teoría de la relatividad siempre superaba considerablemente el de aquellos quienes la comprendían. Sin embargo, el propio hecho del enorme interés de la masa de personas a los problemas de la gravitación sobre los cuales un día antes ninguna de éstas ni siquiera pensó, era, sin duda, muy remarcable. Entonces, ¿en qué reside aquí el asunto? Es que la teoría general de la relatividad creada por Einstein (todavía tendremos que hablar detalladamente acerca de la esencia de esta teoría) no tenía, como tampoco lo tiene ahora, ningún valor aplicado, práctico. No ayudó a construir ni una sola máquina, no proporcionó a nadie alimento ni vestido, mas, a pesar de todo, sobre Einstein y su teoría se habló, se discutió y se seguía hablando más que sobre cualquier otro científico que, probablemente, hiciera muchísimo para satisfacer las necesidades prácticas de los hombres. Por supuesto, aquí no se trata de "moda", ni de publicidad sensacional y ni siquiera de que la teoría dejó pasmados a los hombres por su audacia y su supuesto carácter paradójico. A todas luces, aquí, el papel determinante lo desempeñó el hecho de que la teoría de la relatividad amplió en enorme medida los horizontes de la ciencia y abordó las más fundamentales cuestiones filosóficas de las ciencias naturales, poniendo en el orden del día problemas tan absolutamente nuevos para la física de aquel

período como, por ejemplo, el de la relación entre el espacio, el tiempo y la materia. Según la expresión de Infeld, la humanidad reveló su buen gusto al apreciar como es debido toda la grandeza de los trabajos de Einstein en el campo de la teoría de la relatividad.

Los axiomas de Euclides y el experimento

Sin embargo, antes de pasar a la interpretación einsteiniana de la gravitación, tendremos que hacer una digresión con el fin de conocer algunas ideas que será necesario utilizar en adelante.

Tendremos que hablar acerca de la geometría, o, más exactamente, acerca del espacio y el tiempo. Al parecer, ¿qué hay aquí de común con la gravitación? Sin embargo, precisamente la investigación de espacio físico y del tiempo permitió a Einstein concebir la gravitación de una forma nueva. Pero no conviene adelantarnos.

Hay una admirable sentencia perteneciente a Descartes: "Para conocer la verdad es necesario, una vez en la vida, ponerlo todo en tela de juicio, en la medida de lo posible". Poner en tela de juicio aquello que parece axiomático de por sí, que, al parecer, no admite duda alguna! Saber abrirse camino a través del círculo mágico de las llamadas verdades consabidas las cuales, con frecuencia, parecen evidentes tan sólo por la razón de que no se reflexiona sobre ellas como es debido.

En el curso de muchos siglos los escolares de todos los países estudiaron en las clases de geometría —al igual que lo hacen ahora— el armonioso sistema de los teoremas euclidianos. Y todos estos teoremas derivan lógicamente de los postulados elementales, tan patentes que parecen absolutamente fidedignos, o sea, de los famosos axiomas de Euclides.



La geometría euclidiana formó parte de la física incorporándose a ésta en su conjunto, sin cualesquiera reservas, y, de hecho, sin pensar siquiera en la necesidad de la comprobación. Para Galileo y Newton el espacio no era sino un fondo impasible y frío. El tiempo fluye como si se sometiera a la marcha de cierto reloj mundial absoluto que cuenta los segundos para todo el Universo, con la particularidad de que a este reloj no le puede afectar la materia y el carácter de su movimiento. Y esta concepción del espacio y del tiempo parecía inconmovible hasta los principios de nuestro siglo.

Bueno, ¿y es posible comprobar los propios axiomas de Euclides? ¿Es posible, por ejemplo, comprobar su validez por vía experimental? Aquí se revelan dos enfoques. Por supuesto, pueden encontrarse adversarios de semejante comprobación. Éstos dirán que la geometría, de la misma forma que otros muchos apartados de las matemáticas, debe considerarse como una construcción puramente lógica y, basándose en esta tesis, renunciarán a comparar sus enunciados con la experiencia. Semejante punto de vista es lícito en todos los casos excepto uno, a saber, si nos interesa la geometría del espacio físico "verdadero", real. Pero, por el momento, nos

interesan no cualesquiera que sean espacios "matemáticos" abstractos, sino, precisamente, el espacio real. Y esto significa que la última palabra —y la decisiva— pertenece al experimento. Con ello se dice muchísimo: el experimento puede "no tener gana" de embutirse en los marcos de las ideas acostumbradas para nosotros. Entonces ya surge la necesidad de revisar muchas cosas de aquellas que parecían incuestionables. El experimento incluso en el caso de que esté encaminado a investigar el objeto tan "no material" como el espacio, se reduce, en fin de cuentas, a la observación de la materia, precisamente, en todas sus formas. Y semejante circunstancia, casi inevitablemente (más tarde veremos que la palabra "casi" resulta superflua) debe conducir al establecimiento de *vínculos* entre el *comportamiento* de la *materia*, por una parte, y el carácter del espacio, por otra. Desde luego, lo expuesto se ve, a primera vista, bastante fantástico, pero si se reflexiona más profundamente, resultará que la idea, más acostumbrada para nosotros, sobre el espacio (y, añadimos también, sobre el tiempo) como cierto fondo frío e impasible en que se despliegan todos los acontecimientos, se nos presentará como algo todavía más asombroso y extraño.

Y, finalmente, una cosa más. Si ya recurrimos al experimento, hay que darse cuenta, con claridad, de que ninguno de éstos puede ser absolutamente exacto. Los errores (o, empleando una expresión más delicada, las incorrecciones) del experimento, incluso del más sutil, son algo inevitable. Éstos vienen condicionados por el carácter imperfecto de los instrumentos, por las influencias fortuitas y, a veces, por la propia esencia física del fenómeno. Esto no se olvida nunca en cualquiera que sea investigación física. También nosotros debemos tener presente, todo el tiempo, que, por muy estrictas que nos parezcan

hoy día tales o cuales teorías, en particular, la "geometría física" de la cual hablaremos más adelante, éstas revisten un carácter aproximado y cada día de mañana puede introducir en las mismas correcciones esenciales.

Geometría de Lobachevksi

La idea de que la geometría de Euclides no es la única posible desde el punto de vista lógico se enunció por primera vez en una forma precisa en el siglo pasado. El mérito de crear la primera geometría que, por sus postulados, se diferenciaba de la euclidiana pertenece al gran matemático ruso Lobachevski. (Independientemente, la geometría no euclidiana fue elaborada por el matemático húngaro Bolyai.) A nosotros nos es difícil apreciar ahora, en plena medida, cuánta originalidad científica y audacia debía poseer este relevante matemático de la ciudad de Kazán. Sin embargo, los hechos son bastante elocuentes. Entre los contemporáneos de Lobachevski, probablemente, no más que tres o cuatro matemáticos europeos más eminentes supieron evaluar (o, meramente, comprender) sus ideas. En cuanto a Rusia, Lobachevski no fue comprendido hasta tal punto que en el necrólogo, por ejemplo, se habló mucho sobre su actividad administrativa, pero ni mención se hacía de la nueva geometría creada por él. Incluso Chernyshevski, hombre tan avanzado de aquella época, en la carta a su hijo se pronuncia contra las ideas de Lobachevki, recurriendo, además, lamentablemente, a los argumentos de filisteos y repitiendo que le consideran "chiflado".

No obstante, grandes ideas científicas no pueden extinguirse, incluso en el caso de que en el momento de su aparición parecían extrañas o paradójicas. Más aún, el tiempo de por sí parece

como si se convirtiese en una de las demostraciones de su infalibilidad. Para finales del siglo diecinueve existía ya más que una variante de geometrías no euclidianas (entre éstas la que mayor importancia adquirió para la física fue, más tarde, la geometría de Riemann). Sin embargo, faltaba cierto impulso muy esencial para que estas construcciones puramente lógicas "cobrasen vida", adquiriendo la palpitación de la actualidad.

Teoría especial de la relatividad de Einstein

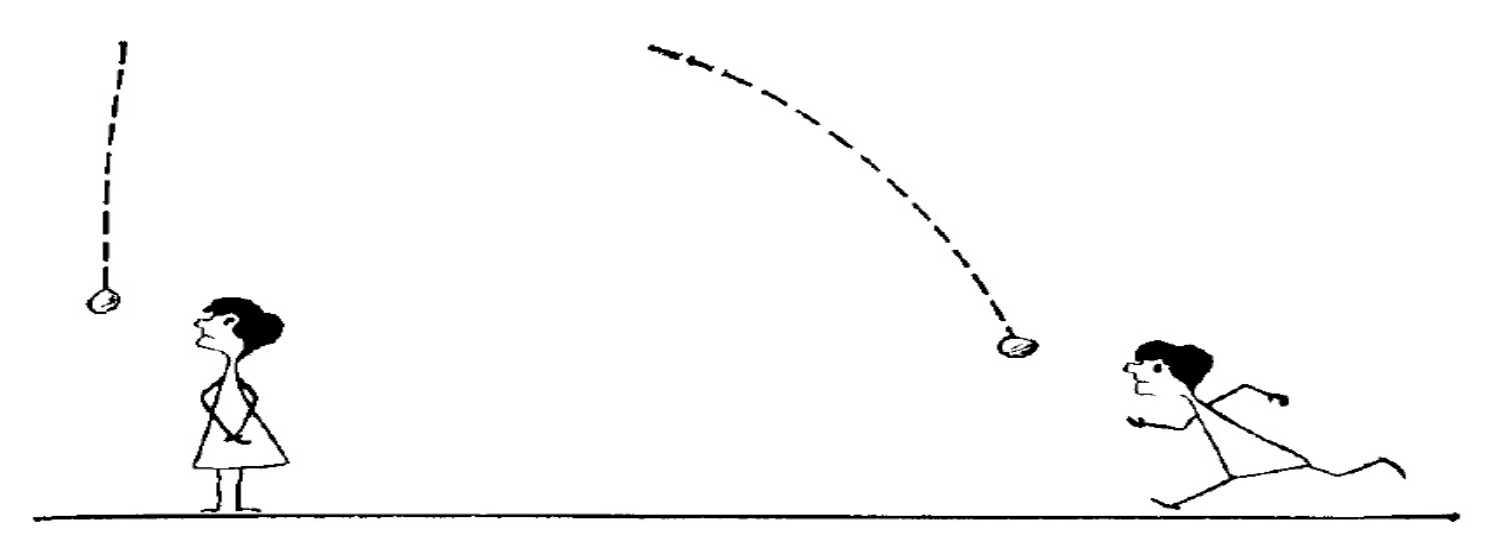
¡Se necesitaba un experimento, un experimento insólito, en que como objeto de investigación interviniera la geometría! En un experimento de esta índole pensaba Gauss, quien a puerta cerrada (y casi en secreto, pues era poco probable que entre aquellos quienes le rodeaban se encontrase alguien que no interpretara su proceder como extravagancia absurda) comprobaba si la suma de ángulos de un triángulo es igual al número π. A este número se refería ya Lobachevski. Y el experimento que asestó el primer golpe a las ideas acostumbradas sobre el espacio y el tiempo apareció. Pero, a primera vista, éste no tenía relación alguna a la geometría.

Toda una serie de experimentos independientes de distinta índole llevó a la conclusión que dejó pasmados a los físicos por su carácter paradójico: cualesquiera que sean los movimientos del observador al medir la velocidad de la luz, éste obtendrá siempre un mismo resultado numérico. Indistintamente, si uno está parado o trata de alcanzar el rayo liminoso, la velocidad de la luz resulta ser absolutamente igual. Del rayo luminoso no se puede huir, como no se puede huir de su propia sombra. Y los

instrumentos, si uno se desplaza raudo al encuentro del rayo, también indicarán la misma velocidad de la luz.

Todo ello no encajaba, de ningún modo, en los marcos de las ideas galileo-newtonianas, evidenciaba su carácter aproximado y dictaba insistentemente la necesidad de crear una nueva teoría que permitiese de una forma cualquiera hacer la intelección de este resultado experimental.

Fue Einstein quíen hizo el paso decisivo en la construcción de esta teoría nueva.



Aquí no estamos en condiciones de relatar detalladamente sobre la "teoría de la relatividad especial" de Einstein. Sólo nos harán falta algunos de sus resultados concretos. Mas, ante todo, dedicaremos algunas palabras a la propia relatividad.

Ya Galileo comprendía con claridad el carácter relativo del movimiento mecánico. No se puede decir simplemente: "el cuerpo se mueve". Es preciso señalar respecto a qué cuerpos (los físicos dicen respecto a qué sistema de referencia) se determina este movimiento.

Se sobreentiende que el perfil exterior del movi-

miento es distinto en los diferentes sistemas de referencia. Las paredes del vagón son inmóviles respecto al sistema de referencia de los pasajeros que en éste se encuentran. Sin embargo, las mismas paredes sí se mueven en el sistema de referencia relacionado con la Tierra. La trayectoria de la pierdra que cae verticalmente tiene distinto aspecto desde punto de vista de un observador inmóvil y de aquel quien se desplaza con rapidez. Es relativa la velocidad, es relativo el camino recorrido por los cuerpos, es relativa la trayectoria. Mas existe algo que no depende de la elección del sistema de referencia: son las propias leyes del movimiento, las leyes de Newton. En todos los sistemas inerciales estas leyes son absolutamente idénticas*. Esto quiere decir, por ejemplo, que si uno se encuentra en una cabina cerrada, entonces, ningún experimento mecánico le dará la posibilidad de determinar si esta cabina está en reposo o se mueve uniformemente. La misma idea puede expresarse de otro modo: todos los sistemas inerciales de referencia son equivalentes. No se puede destacar entre éstos uno absolutamente inmóvil, al igual que tampoco se puede hallar otro absolutamente móvil.

Einstein generalizó este principio extendiéndolo no sólo a la mecánica, sino también a otros procesos cualesquiera. El hecho experimental de la constancia de la velocidad de la luz lo admitió como el segundo requerimiento inicial que debe satisfacer la nueva teoría.

En lo sucesivo, necesitaremos solamente uno de los importantes corolarios de la teoría de la relatividad de Einstein, a saber, la así llamada reducción de

* Con una gran precisión, se puede considerar como inercial el sistema de referencia cuyo centro está relacionado con el Sol y los ejes están dirigidos a las estrellas inmóviles, o bien, a otro sistema cualquiera que se mueve a velocidad constante respecto al primero.

las longitudes. Si se mide la longitud de cierta barra en el sistema de referencia en el cual dicha barra está en reposo y después la operación se repite en otro sistema respecto al cual la barra se mueve (en dirección longitudinal), la segunda longitud resultará ser menor que la primera. Cambia la propia geometría, tiene lugar la variación de la escala de longitudes en la dirección del movimiento.

Cabe señalar, a propósito, que la marcha del reloj también acusa diferencias sustanciales en los diferentes sistemas inerciales de referencia. La marcha más rápida la tiene el reloj en aquel sistema con respecto al cual está en reposo. En cualquier otro sistema el tiempo transcurre más lentamente, y este fenómeno (igualmente que la reducción de las longitudes) se manifiesta con tanta mayor intensidad cuanto más se aproxima la velocidad del sistema a la de la luz. A propósito. precisamente porque la mecánica de Galileo y Newton nació a base de las observaciones del movimiento de los cuerpos que se desplazaban con relativa lentitud (a velocidades mucho menores que la de la luz que alcanza casi trescientos mil kilómetros por segundo), resultó posible hablar sobre el tiempo único, absoluto, haciendo caso omiso de la reducción de las longitudes).

Prinicpio de equivalencia

Sin embargo, ¿qué relación puede existir entre la relatividad de las longitudes y el problema de la gravitación? Este problema lo abordemos precisamente ahora. ¿Se acuerda el lector de aquello que al principio de este capítulo llamamos "propiedad admirable de las fuerzas de gravitación"?

¡Las masas pesada e inerte son iguales!

Todos los cuerpos, independientemente de su

naturaleza y masa, por la acción de las fuerzas gravitacionales adquieren aceleraciones absolutamente iguales. ¿Cómo se explica esto? En efecto, no se puede atener siempre a coincidencias casuales, ya que el hecho, de por sí, es significativo.

Al meditar sobre este problema, Einstein prestó atención a la circunstancia que, claro está, hace mucho conocían perfectamente todos los físicos, pero que a nadie ocurrió relacionar con la gravitación. Para comprender en qué radica aquí el asunto figurémonos que estamos en la cabina de una nave cósmica que se encuentra en vuelo libre (con los motores desconectados). Llegó el estado de ingravidez. Todo parece como si, en general, no existiera ninguna gravedad. El péndulo quedará parado en posición inclinada, el agua vertida de un vaso "flotará" en el aire en forma de una gran gota esférica y a su lado, como colgados de hilos invisibles, quedarán inmóviles los demás objetos, independientemente de su masa y forma. Empujemos una pesada haltera y ésta comienza a volar suavemente atravesando la cabina. Si no hubiera sido por la resistencia del aire, su movimiento sería absolutamente uniforme.

Y todos estos fenómenos, como se debe señalar, no exigen de modo alguno que la propia nave cósmica se encuentre lejos de las estrellas y los planetas, fuera del alcance de su acción gravitacional. Por ejemplo, la ingravidez aparece en todas las naves cósmicas que realizan el vuelo alrededor del globo terráqueo. Es completamente evidente que estas naves se encuentran en la esfera de acción de casi las mismas fuerzas gravitacionales que en la superficie de la Tierra. El cosmonauta no percibe estas fuerzas debido a la siguiente causa relativamente simple. El movimiento de la nave cósmica se compone del movimiento uniforme horizontal y de la caída

acelerada vertical, dirigida hacia el centro de la Tierra. Ya hemos mencionado que es imposible advertir el movimiento uniforme en el interior de la cabina orientándose por el comportamiento de los objetos. En cuanto a la caída, en efecto, todos los objetos en la cabina caen por acción de la atracción terrestre. Pero —cabe recordar— lo hacen con una aceleración absolutamente igual. Y con la misma aceleración caen al suelo, las paredes y el techo de la cabina. El cosmonauta ha caído en un metro, pero justamente en un metro descendió debajo de él el sillón. Como resultado, el cosmonauta puede quedarse en vilo sobre el asiento.

En otras palabras, las fuerzas gravitacionales que se manifiestan explícitamente en el sistema de referencia relacionado con la Tierra desaparecen cuando se pasa a un sistema en caída libre (se sobreentiende, desde luego, no desaparecen simultáneamente en todo el espacio alrededor de la Tierra, sino tan sólo en el ámbito reducido de la cabina*).

No es casual que hayamos empleado aquí la palabra "desaparecen". Efectivamente, cuando uno se encuentra en una cabina cerrada que cae (los físicos, siguiendo a Einstein, hablan, con frecuencia, de un "ascensor que cae"), cualquiera que sea el experimento, cualesquiera que sean los instrumentos utilizados o el fenómeno examinado, es imposible siquiera descubrir los indicios de la gravitación.

Cabe señalar, de paso, que nos encontramos

* Sería erróneo pensar que aquí las paredes de la cabina *hacen las veces de una especie de fronteras gravitacionales*. Las dimensiones de la zona en que deja de percibirse la gravitación no se determinan por el tamaño de la cabina, sino por las distancias a que puede desplazarse cualquier cuerpo, sin advertir la variación de las fuerzas gravitacionales por su magnitud y dirección.

con este fenómeno constantemente, incluso sin ocupar el asiento en la cabina de la astronave. Nuestra Tierra también es un gigantesco viajero cósmico y junto con todos sus habitantes se mueve dirigida por la atracción del Sol. Pero nosotros no sentimos esta atracción. Y la causa de ello no es la insignificancia del efecto, sino, otra vez, el hecho de que el movimiento de la Tierra por su órbita representa, en esencia, una incesante caída*.



Tan sólo las mareas de las cuales ya hemos hablado sirven de recuerdo constante y patente sobre la atracción por parte del Sol y la Luna.

Después de todo lo expuesto surge la pregunta: ¿si es posible, a costa de la transición a un sistema de referencia acelerado, eliminar las fuerzas gravitacionales, no se puede, de la misma

* El movimiento de las naves satélites alrededor de la Tierra y el de la Tierra alrededor del Sol en detalles no esenciales no se parece a la simple caída. En el último caso el movimiento es rectilíneo. Esta diferencia puede descubrirse en el experimento realizado en el interior de la cabina.

manera, crearlas? Por una parte parece que sí, se puede. Por ejemplo, si el mecánico de la futura nave interestelar regula el motor de tal modo que por cada segundo la velocidad incremente en diez metros por segundo aproximadamente, la tripulación se verá en las mismas condiciones gravitacionales que todos los hombres en la Tierra. Por otra parte, sin embargo, involuntariamente surgen dudas. Cada momento parece que tenemos que ver aquí con un sucedáneo de la gravedad. Pero cualquier imitación, por muy perfecta que sea, se distingue en algo del original, pero nosotros, en nada, literalmente en nada, tenemos diferencia alguna. Pues la propiedad principal de las fuerzas gravitacionales consiste en que éstas aceleran en una forma absolutamente igual cualesquiera cuerpos. Y esta propiedad en un sistema que se mueve con aceleración se asegura —si se permite decir así— automáticamente. Desde el punto de vista de este sistema en todos los cuerpos aparecen aceleraciones idénticas, iguales por su magnitud y opuestas por la dirección a aquella que este sistema de por sí tiene desde el punto de vista de sistemas inerciales.

De este modo, al analizar todas las circunstancias, nos convencemos de que podemos atrevernos a enunciar la siguiente tesis de extraordinaria importancia: en cada zona lo suficientemente pequeña* del espacio *no hay ningún ex-*

---

* Aquí, una zona del espacio se considera pequeña si la acción gravitacional no varía durante el desplazamiento de los cuerpos dentro de ésta. Está claro, por ejemplo, que desde este punto de vista, la enorme sala del Palacio de los Deportes en Luzhnikí es, con gran reserva de precisión, una zona suficientemente pequeña. Al mismo tiempo, toda la Tierra ya no puede constituir tal zona, ya que aquí no se pueden despreciar las variaciones de las fuerzas gravitacionales por su magnitud y dirección.

perimento físico por cuyo medio sea posible distinguir el movimiento de los cuerpos, debido a la acción de las fuerzas gravitacionales, de su movimiento en un sistema acelerado y elegido de modo correspondiente. O, más brevemente: la gravitación en cada punto del espacio es equivalente a la aceleración debidamente elegida del sistema de referencia. De acuerdo a Einstein, la equivalencia concierne no sólo a los movimientos mecánicos, sino también a cualesquiera procesos, en general.

De este modo, hemos llegado al famoso principio de equivalencia de Einstein que es una de las más profundas hipótesis de la teoría moderna, principio que, como nos convenceremos a continuación, conduce, inevitablemente, al establecimiento de un vínculo estrechísimo entre la gravitación y la geometría.

En un campo de gravitación la geometría no puede ser euclidiana

La necesidad de este vínculo es evidente, partiendo, aunque sea, del siguiente razonamiento sencillo: en la geometría de Euclides acostumbrada para nosotros (debido a las causas que se harán comprensibles para nosotros más tarde ésta se denomina geometría "plana") la relación de la longitud de la circunferencia al diámetro es igual al número "π" ($\pi = 3{,}14\ldots$). Este número puede obtenerse al dividir la cantidad de barras muy pequeñas colocadas a lo largo de la circunferencia entre la de las barras colocadas a lo largo del diámetro. Ahora veremos a qué es igual esta relación desde el punto de vista del sistema de referencia que gira junto con la circunferencia. Supongamos que el experimentador, en este sistema de referencia, comience a colocar las mismas barras a lo largo de la circunferencia

y del diámetro. El resultado a que llegará puede establecerse analizando este proceso de medición desde el punto de vista del sistema inercial. De acuerdo con la teoría de la relatividad cada barra colocada a lo largo de la circunferencia se reduce, mientras que las colocadas a lo largo del diámetro no deben experimentar reducción, pues sus direcciones son perpendiculares a la velocidad del movimiento. Esto significa que el experimentador que se mueve, colocará por la circunferencia mayor número de barras que aquel que no se mueve, el tanto que a lo largo del diámetro su número quedará el mismo. Ésta es la razón de que en un sistema de referencia que gira la relación entre la longitud de la circuenferencia y el diámetro es mayor que π. Pero ¡esto es posible sólo si *ha cambiado la propia geometría*, si ésta dejó de ser euclidiana! Y, lo que es muy interesante, el carácter de la nueva geometría viene determinado unívocamente por la aceleración con la cual se mueven los distintos puntos del sistema de referencia.

Ahora nos queda por hacer un paso más, y llegaremos a nuestro objetivo. Al admitir el principio de equivalencia, convenimos considerar que todos los resultados obtenidos en los sistemas los cuales se mueven aceleradamente tendrán lugar en los sistemas inerciales si está presente la gravitación, pero, de ser así, la propia gravitación se puede considerar como una desviación respecto a la geometría euclidiana o, como la calificaremos en adelante, para brevedad, "curvatura del espacio".

Se ha hecho la deducción, quizá la más asombrosa entre la totalidad conocida por la física en todo el tiempo de su existencia: ¡la gravitación está relacionada con la curvatura del espacio! Resulta que el papel del agente a que se refería en su tiempo ya Newton y el cual los

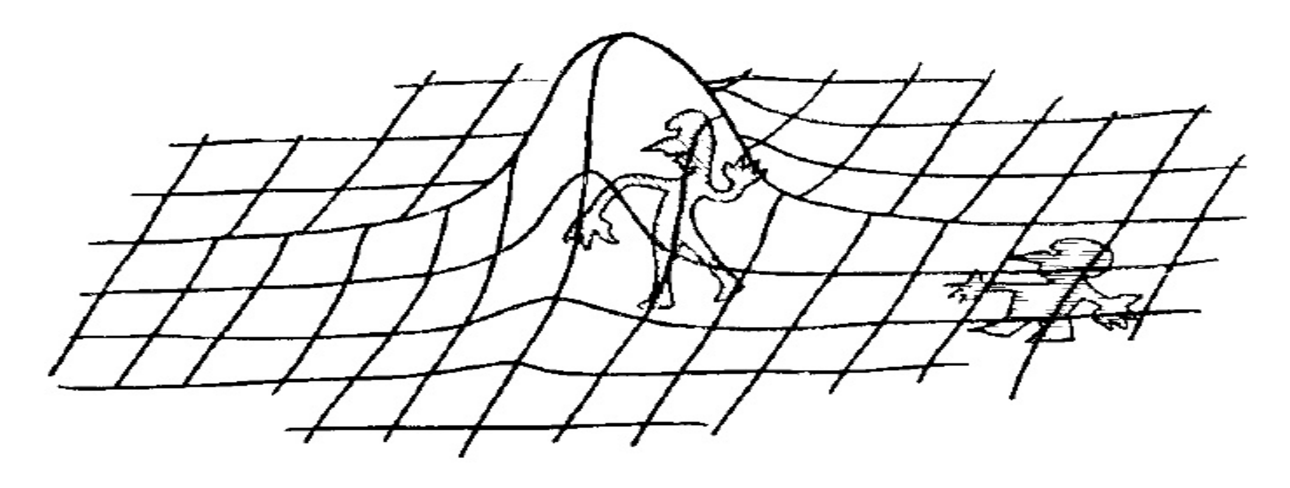
cartesianos relacionaban con los misteriosos torbellinos existentes entre los cuerpos, este papel pertenecía a las propiedades del espacio mismo, a su geometría.

Intentemos, recurriendo a un modelo muy simple, introducir en esta deducción abstracta y extraordinariamente compleja por lo menos un elemento patente.

Geometría de seres bidimensionales

Figúrense una película de goma extendida con un retículo trazado sobre ésta. La misma hará las veces de una red de coordenadas (red cuadriculada). Es el modelo del espacio (pero no de tres, sino de dos dimensiones) que posee propiedades euclidianas. Si se imagina que en esta película viven ciertos seres bidimensionales fantásticos los cuales, además, poseen intelecto, resultará que entre éstos, tarde o temprano, debe aparecer su propio Euclides que formulará los fundamentos de geometría, con la particularidad de que los mismos serán análogos a la ordinaria geometría euclidiana sobre el plano.

Pero he aquí que prensamos con el dedo sobre cierta porción de la película. Esta porción se dilató, los ángulos entre las líneas cambiaron, la relación de la longitud de la circunferencia al diámetro dejó de ser igual a π, la suma de los ángulos del triángulo se hizo distinta de π, en una palabra, tuvo lugar un fenómeno que los geómetras bidimensionales, inevitablemente, deberían interpretar como la infricción de la geometría euclidiana, como la curvatura del espacio. Presten atención a que todos estos fenómenos se manifiestan con tanta mayor fuerza cuanto más cerca se encuentra la porción de la película al cuerpo perturbador, o sea, en nuestro ejemplo, al dedo que ejerce la presión.



Puede aparecer la tentación de continuar desarrollando la analogía con la película. En efecto, ¿qué nos impide comparar la acción del dedo que presiona sobre la película con la acción de las masas que provocan la gravitación? Tanto más que debido a la presión del dedo en un punto de la película, en todos los demás lugares de ésta aparecen las correspondientes tensiones elásticas que dan ganas de compararlas con las fuerzas gravitacionales (a propósito, éstas también disminuyen en función de la distancia casi del mismo modo que la gravitación). Sin embargo, esta analogía no puede considerarse muy profunda. La gravitación, por supuesto, no guarda relación alguna con la elasticidad. El parecido comienza y termina en el aspecto puramente geométrico.

¿Qué es la línea recta?

Podemos abordar la necesidad de vincular la geometría con la gravitación también por el otro extremo. Entre los axiomas de Euclides hay uno que dice: a través de dos puntos puede trazarse tan sólo una línea recta. Este enunciado representa, por decirlo así, una de aquellas verdades consabidas que, siguiendo a Descartes, trataremos de poner en tela de juicio. Línea recta... Pién-

selo bien. Hablando con propiedad, ¿qué es esto: línea recta?

Claro está, sería ingenuo contestar que línea recta es una línea trazada aplicando la regla. Antes, hay que comprobar de alguna manera si la propia regla no está encorvada.

Probablemente, algunos de los lectores se acuerden de que una recta es la distancia más corta entre dos puntos. Pero estos lectores, inmediatamente, tendrán que pensar cómo, en realidad, se deben medir las distancias. Para hacerlo, otra vez se necesitará una regla, y, además, una regla *recta*. Obtenemos, pues, un círculo vicioso.

Desde luego, podríamos tratar de hablar sobre hilos tendidos tensamente. No en vano se dice: "...recto como una cuerda". Pero semejante analogía nos enredaría en tal maraña de problemas de la teoría de la elasticidad que mejor sería soslayarlos.

Existe otro método, el más simple, de determinación de las rectas. El hombre ya hace muchísimo tiempo aprovecha los rayos de luz como líneas idealmente rectas. ¿Qué hace uno para comprobar si la regla no está encorvada? Se la acerca a los ojos y se mira a lo largo de la arista, o sea, se compara la arista de la regla con el rayo luminoso. En esencia, dondequiera que se aplique la geometría en la práctica de los hombres —y esto se lleva a cabo, literalmente, a cada paso— se hace uso de este principio. El mismo es tan sencillo que ni siquiera se dan trabajo de reflexionar sobre éste.

¿Y es sencillo de verdad? Por supuesto, lo es como procedimiento práctico. No obstante, tras esta sencillez se oculta un sentido físico muy profundo.

Para aplicar un patrón cualquiera, es preciso estar seguro de que sobre éste no ejerce influencia el medio ambiente y que él es estable. Como

demuestra un profundo análisis teórico el rayo luminoso posee en altísimo grado esta estabilidad: no está sujeto a ningún influjo*. Por lo demás, esto no es exacto del todo. Existe una fuerza que ejerce influencia también sobre la luz. Es remarcable que esta fuerza es la gravitación. Sí, precisamente la fuerza de la gravitación *universal* justifica una vez más su nombre: la influencia de la gravitación sobre la luz está demostrada actualmente por medio de experimentos directos.

Curvatura de los rayos luminosos

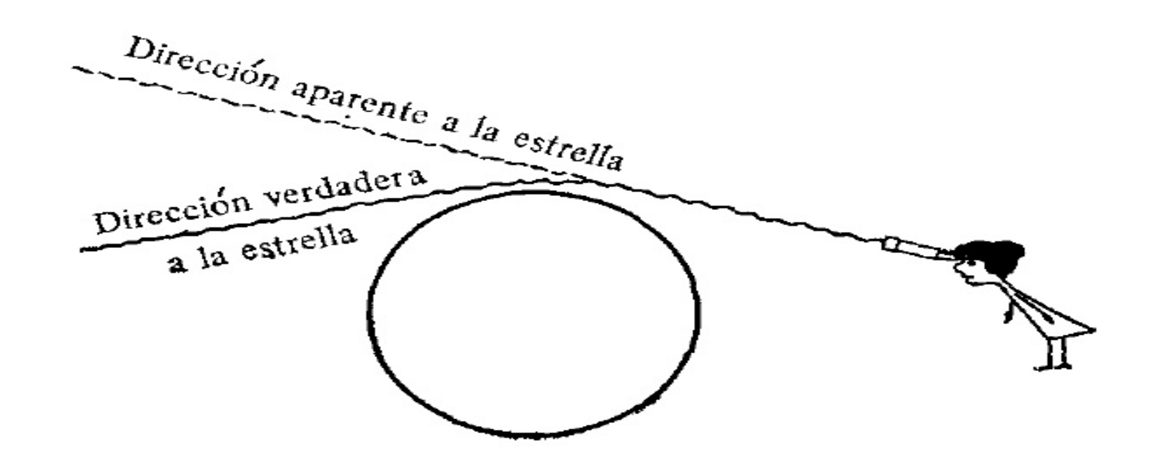
Los astrónomos, al observar las estrellas determinan con precisión su posición en el firmamento, marcándola en el mapa estelar. Y no en vano las estrellas se denominan inmóviles. El mapa estelar compuesto cien años atrás coincide con el de hoy con un alto grado de exactitud. Al parecer, todo el mundo está acostumbrado a esta circunstancia. Pero he aquí que Einstein intervino con un vaticinio sorprendente: durante el eclipse del Sol todas las estrellas situadas cerca del disco solar eclipsado por la Luna deben desplazarse, deben comportarse como si se alejaran del Sol. En efecto, este desplazamiento fue detectado. Una explicación sencilla y evidente de este fenómeno aparecerá de inmediato, si se admite que los rayos de luz, por impacto de la gravitación, se desvían en el sentido del Sol. En efecto, sea que el rayo proveniente de la estrella y dirigido hacia la Tierra pasa cerca del Sol (está claro que la atracción del Sol se dejará sentir noto-

---

* Lo expuesto no contradice los fenómenos de reflexión y de refracción de las ondas: estos procesos se reducen a reiteradas y múltiples absorciones y emisiones de ondas. Mientras tanto la onda luminosa, entre su emisión y absorción, efectivamente, no experimenta influjos.

riamente tan sólo a distancias pequeñas) y experimenta una desviación. El observador terrestre que hubiese visto la estrella en el centro del ocular de no haber pasado el rayo de luz en las cercanías del Sol, advertirá ahora esta estrella en el centro del campo visual del ocular sólo en el caso de desviar un poco el telescopio del Sol. La teoría de Einstein describe bien cuantitativamente y —se quiere decir— con naturalidad la desviación de los rayos luminosos por influencia de la gravitación, prediciendo ángulos de desviación muy próximos a los medidos por los astrónomos.

Aquí, no podemos internarnos en los pormenores de los cálculos cuantitativos que lo confirman.



Sin embargo, trataremos de demostrar que si es justo el principio einsteiniano de equivalencia, entonces, el rayo de luz, inevitablemente, debe desviarse. Comencemos por una comparación. Figúrense que se encuentran en un tren en movimiento. Llueve, y las gotas trazan unas rayas en los vidrios. Si el tren marcha uniformemente, las rayas serán rectas. En cambio, con un movimiento acelerado las mismas se encorvarán (¡curvatura!) Cualesquiera otros chorros también se encorvarán desde el punto de vista de los pasa-

jeros del tren que acelera su marcha. Tampoco forman una excepción los chorros luminosos.

Ahora recordemos que de conformidad con el principio de Einstein la aceleración es equivalente a la presencia de la gravitación. Por consiguiente, la curvatura de los rayos de luz (y, añadiremos, de rayos formados por los flujos de cualesquiera partículas) es inevitable bajo la influencia de la gravitación.

Cómo se ha "pesado" la onda electromagnética

El segundo experimento que demuestra la influencia de la gravitación sobre la luz reviste el carácter y la escala completamente terrestres. El lector conoce que para escuchar la transmisión de una estación de radio es necesario sintonizar el receptor con su onda. Pero la idea que exponemos ahora, de seguro, no le ocurría a todo el mundo: ¿se alterará o no la sintonía si se sube con el receptor a una montaña alta o se desciende a un lugar bajo? "Claro que no se alterará", dirá el lector. ¿Qué papel, entonces, puede desempeñar semejante subida o bajada?

Su papel es el siguiente: al principio la sintonía se realizaba en un nivel determinado, pero después, cuando el receptor resultó elevado a la altura, las ondas electromagnéticas desde el emisor hacia el receptor deberán subir, superando las fuerzas de la gravedad terrestre. El experimento demuestra que, efectivamente, en este caso las ondas perderán energía y, al mismo tiempo, disminuirá su frecuencia. Por supuesto, la sintonía de los receptores y emisores comunes y corrientes es tan burda que es imposible advertir este fenómeno. Sin embargo, hace poco los físicos lograron encontrar receptores y emi-

sores de sintonía superexacta. No piensen que se trata de dispositivos de tipo radiotécnico ordinario; en el caso dado, tanto el aparato receptor, como el emisor no eran sino cristales especiales en cuya composición entraban átomos con núcleos capaces de emitir y absorber ondas electromagnéticas de energía muy grande, o sea, los llamados cuantos γ de frecuencia fijada con suma precisión.

En los experimentos de Mössbauer llevados a cabo de acuerdo con este esquema, para advertir la "aceleración"* del rayo que caía resultó suficiente la diferencia de los niveles igual a una decena de metros. Estos experimentos récord en cuanto a su precisión representan una demostración directa del hecho de que la luz tiene "peso" y que sobre las ondas electromagnéticas, al igual que sobre todos los demás tipos de materia, ejerce influencia la gravitación.

Las líneas espectrales de la luz proveniente de las estrellas están desplazadas algo hacia el lado del extremo rojo del espectro, con la particularidad de que este desplazamiento es tanto más considerable, cuanto mayor es la masa de la estrella. Es, en esencia, el mismo experimento de Mössbauer, pero realizado a escala cósmica. A veces éste se aplica para medir la masa de las estrellas. El efecto en cuestión, como asimismo la curvatura de los rayos que pasan en la cercanía de los cuerpos macizos, fue presagiado por Einstein.

---

* Claro está que esta "aceleración" no se debe entender en el sentido mecánico habitual de la palabra. No se tiene en cuenta el aumento de la velocidad de la luz, ya que ésta, en el vacío (en el aire, prácticamente, sucede lo mismo) es constante, sino el crecimiento de la energía.

La clase de geometría en un planeta fantástico

Ahora llegó la hora para cotejar todo lo expuesto anteriormente. Hemos establecido que el mejor de los patrones de la recta es el rayo de luz en el vacío. Al mismo tiempo, este rayo, por impacto de la gravitación —y solamente de la gravitación— se desvía o, si quiere decir así, se encorva. He aquí que otra vez, pero de nuevas posiciones, hemos llegado al mismo resultado que antes. La única diferencia consiste en que entonces hemos hablado sobre la curvatura del espacio y ahora empleamos la expresión: rectas encorvadas.

En su tiempo, la deducción hecha por Einstein sobre el vínculo indisoluble entre la gravitación y la curvatura del espacio, literalmente dejó pasmado a todo el mundo. Parecía demasiado inesperada e importante a todos aquellos quienes reflexionaban sobre el problema de la gravitación. Mas, ante todo, probablemente, inesperada y fuera de lo común.

Otra vez volvamos a recordar las clases de geometría en la escuela. En éstas el maestro no hacía mención alguna de la gravitación. No enseñaba, por ejemplo, que ¡a través de dos puntos, para un valor determinado de las fuerzas gravitacionales, sólo se puede trazar una recta! Sí, no lo enseñaba, pero tan sólo debido a lo que la geometría de Euclides se desarrolló de la práctica de los hombres residentes en la Tierra donde la influencia que la gravitación ejerce sobre la geometría es tan insignificante que incluso en la actualidad, valiéndose de equipos modernos, es muy difícil —casi imposible— advertir la inexactitud de esta geometría.

Y ahora, mentalmente, traslademonos a un planeta (supongamos que existe uno semejante) donde la fuerza de la gravedad supera decenas

de millones de veces la nuestra. Podemos imaginar unas condiciones tales que el rayo de luz dirigido horizontalmente sea incapaz de vencer la atracción viéndose obligado a envolver el planeta paralelamente a su superficie, a guisa de satélite. Y si figuramos a continuación, dando rienda suelta a nuestra fantasía, que en este planeta existen escuelas, entonces, en las clases de geometría el maestro debería decir, probablemente, algo por el estilo: "La luz en el vacío se mueve siguiendo una recta. Figurémonos un potentísimo reflector suspendido sobre uno de los polos que envía un haz de rayos por la horizontal. Supongamos que no hay dispersión, ni refracción, ni absorción de la luz. En este caso, los rayos, al pasar sobre la superficie del planeta, llegarán al segundo polo y, dejándolo atrás, regresarán —únicamente que por otro lado— al reflector. Al girar un poco el reflector, Uds. obtendrán otro rayo, otra recta que también pasa a través de ambos polos. Y se puede obtener tantas rectas de este género como se quieran. Se parecen mucho a los meridianos que unen los polos. De este modo, niños, pueden ver que a través de dos puntos —en el caso dado, a través de dos polos— se puede trazar un número infinito de líneas rectas. Retengan bien en la memoria este axioma, ya que el mismo forma una de las bases de la geometría. Les comunicaré, niños, sin entrar en detalles, que los matemáticos, razonando, llegaron a concebir una geometría en que a través de dos puntos pasa una sola recta; no obstante, esto, difícilmente, podría hallar alguna aplicación práctica".

Los alumnos aprenderán esta tesis y, al contestar la lección, dirán que las líneas paralelas se atraviesan y que la suma de los ángulos del triángulo no es igual al número π; más tarde, en su actividad práctica después de haber ter-

minado la escuela, ellos nunca toparán con cualquiera que sea paradoja geométrica.

Podríamos relatar muchas cosas más sobre este maravilloso planeta en el que, de principio, cada uno, por ejemplo, puede ver su propia nuca sin recurrir a los espejos, pero, a lo mejor, es tiempo ya de retornar a la Tierra. Nuestro viaje imaginario fue aleccionador: una vez más nos hemos convencido de que lo acostumbrado no debe ser, de modo obligatorio universal y únicamente posible. Resulta que ni siquiera la geometría forma una excepción.

Una porción de dudas más

Nos queda por añadir una sola cosa más. El lector atento se habrá fijado en que en todos nuestros razonamientos sobre los rayos de luz está presente cierto elemento de ingenuo espíritu práctico. En la práctica —decimos— el rayo de luz interviene como patrón de la línea recta, y por cuanto dicho rayo se encorva por la gravitación, esto significa que la propia gravitación está relacionada con la curvatura de la geometría. ¿No es que pusimos un acento demasiado fuerte en las palabras "en la práctica"?

Es que de este modo, alegando la "práctica" podemos encontrarnos en la maraña de las más elementales contradicciones. "En la práctica" la porción de la Tierra que abarca nuestra vista es aproximadamente plana. Empero, no podemos sacar de esta circunstancia la conclusión de que toda la Tierra es plana. "En la práctica" la cucharita sumergida en un vaso de té parece quebrada, pero, teniendo en cuenta la refracción de la luz en la superficie de separación entre el agua y el aire, sabemos restablecer el verdadero cuadro. ¿Es posible, entonces, de una forma análoga, tomar también en consideración

aquella "refracción" de los rayos de luz que se debe a la gravitación, introduciendo la correspondiente corrección?

Mas, ¿qué significa introducir la correción? Tenemos procedimientos para convencernos de que la Tierra es esférica y la cucharita sumergida en el vaso no está quebrada. Son procedimientos experimentales. Por ejemplo, si se asciende, como lo hicieron los cosmonautas, a una altura lo suficientemente grande, desde este nuevo punto de vista el carácter esférico de la Tierra llega a ser perceptible para el ojo. ¿Pero dónde se puede encontrar el "punto de vista" que permita separar la geometría de la gravitación? ¿Qué experimento esté en condiciones de demostrar, por ejemplo, que "en la realidad" las rectas quedan rectas, el espacio es "plano" y son tan sólo los rayos luminosos los que se encorvan? Para un experimento de esta índole se requerería un patrón absoluto de rectitud. ¡Pero, precisamente, de éste carecemos!

Sin embargo, ni siquiera aquí reside la esencia. Un lector atento podría hacer también la siguiente pregunta. Figurémonos por un instante que, en general, no existe patrón alguno de las líneas rectas y que, por ejemplo, en la Tierra todas las reglas son encorvadas y no sabemos enderezarlas. ¿Qué resultará, entonces? ¿Acaso debido a ello nuestra geometría terrestre se convertirá en menos parecida a la euclidiana? ¿Acaso por la mera razón de que utilizamos no la acostumbrada red rectangular de coordenadas cartesianas, sino la geográfica curvilínea de paralelos y meridianos cambia de algún modo la suma de los ángulos de triángulo? ¡Claro que no! Entonces, ¿en qué consiste el asunto?

Se sobreentiende que otra vez se trata del principio de equivalencia. Acuérdense de los razonamientos sobre un disco en rotación por el

cual comenzamos nuestro relato*. Aquí, lo esencial no consiste en que ciertas líneas rectas se convirtieron en curvas, sino en que se alteraron las propias relaciones geométricas: se hizo distinta la relación entre la longitud de la circunferencia y su radio en comparación con aquello que enuncia la geometría de Euclides. Y en virtud del principio de equivalencia el mismo efecto debe producirse por las fuerzas de gravitación universal (por supuesto, correspondientemente seleccionadas).

Y la curvatura del rayo de luz que utilizamos para ilustrar patentemente lo que representa la geometría física no es causa, sino efecto de la curvatura de la geometría.

La "alegoría de Eddington"

Retornemos ahora otra vez a la ley de la gravitación universal. Durante tanto tiempo nos dedicamos a la curvatura del espacio que puede parecer como si olvidáramos en aras de qué, precisamente, se inició la conversación. No, claro que no lo olvidamos. Más, aún, todo lo expuesto con anterioridad es, en esencia, una nueva interpretación de la gravitación.

Lo ilustra bien la alegoría del físico y astró-

---

* Hagamos mención del hecho de que el ejemplo con el disco permite también demostrar la influencia de la gravedad sobre la marcha del reloj. En efecto, cuanto más lejos está situado el reloj del centro de un sistema en rotación tanto mayor es su velocidad y, por consiguiente, tanto más lenta es su marcha. Pero, por otra parte, la aceleración también incrementa a medida que crece la distancia desde el centro. En consecuencia, basándonos en el principio de equivalencia, podemos, en el acto, sacar la siguiente conclusión: cuanto más fuerte es la gravitación en el lugar en que se encuentra el reloj, tanto más lenta es su marcha. Respectivamente, se puede hablar sobre la curvatura del tiempo en el mismo sentido que sobre la curvatura del espacio.

nomo inglés Eddington tomada de su libro "Espacio, tiempo y gravitación" que nos permitimos exponer (con pequeños comentarios entre paréntesis).

"En el océano que no tenía más que dos dimensiones vivía una vez la raza de peces planas. Se observó que, en general, los peces nadaban por líneas rectas hasta encontrar en su camino obstáculos evidentes. Este comportamiento parecía completamente natural. Sin embargo, en el océano existía una zona misteriosa; cuando los peces caían en esta zona, parecían embrujados; algunos la atravesaban, pero cambiaban la dirección de su movimiento, otros giraban en ella infinitamente. Un pez (casi Descartes) promovió la teoría de torbellinos; este pez decía que en dicha zona se encuentran remolinos de agua que hacen dar vueltas a todas las cosas que a éstos van a parar. Con el transcurso del tiempo se propuso otra teoría, mucho más perfecta (teoría de Newton); se enunciaba que todos los peces atraen a otro pez muy grande, el pez Sol que yace adormecido en el centro de la zona, explicando con ello la desviación de sus rutas. Al principio, esta teoría parecía, quizá, un poco extraña, pero se confirmó con una sorprendente exactitud en las más diversas observaciones. Se ha hallado que todos los peces poseen esta propiedad de atracción, proporcional a su tamaño; la ley de la atracción (análogo de la ley de la gravitación universal) era extraordinariamente simple, pero, a pesar de esta cualidad suya, explicaba todos los movimientos con tanta precisión que nunca antes hubieran alcanzado las investigaciones científicas. La verdad es que algunos peces declaraban, refunfuñando, que no comprenden cómo es posible semejante acción a distancia; pero todos coincidían en que esta acción se propaga con la ayuda del océano y

que será más fácil formarse la idea sobre la misma cuando se haya estudiado mejor la naturaleza del agua. Por esta razón, casi todo pez que quería explicar la atracción comenzaba sugiriendo la existencia de un mecanismo cualquiera por cuyo medio la atracción se propaga a través del agua.

Pero se encontró un pez que enfocó el asunto desde otro ángulo. Prestó atención al hecho de que tanto los peces grandes, como los pequeños siempre se desplazaban por los mismos caminos, aunque podía parecer que para desviar de su ruta un pez grande se necesitaría mayor fuerza. (El pez Sol comunicaba a todos los cuerpos igual aceleración). Debido a ello dicho pez, en vez de fuerzas, empezó a estudiar detalladamente los caminos que seguían los peces en su movimiento, y así llegó a una resolución pasmosa del problema. En el mundo había un lugar prominente donde yacía el pez Sol. Los peces no podían advertirlo directamente porque eran bidimensionales; sin embargo, cuando un pez, en su movimiento, llegaba a la pendiente de esta prominencia, resultaba que, a pesar de sus intentos de nadar siguiendo una línea recta, este pez, involuntariamente, torcía algo a un lado. (Cuando un caminante avanza por la cuesta izquierda de la montaña, éste debe, conscientemente, desviarse hacia la izquierda, si quiere conservar su dirección inicial por la brújula). En ello consistía el secreto de la misteriosa atracción o de la curvatura de los caminos que tenía lugar en la enigmática zona.

Por supuesto, entre aquello que se relata en esta alegoría y el tema que nos interesa no existe plena analogía, debido a que la prominencia de que se habla se refiere solamente al espacio, mientras que nosotros tenemos que tratar con la "prominencia" en el espacio — tiempo. (En

nuestro libro no podemos detenernos más detalladamente en este tema). Sin embargo, esta alegoría demuestra cómo la curvatura del mundo en que vivimos puede crear la ilusión de la fuerza de atracción, y vemos que el efecto similar a la atracción es lo único en que semejante curvatura puede manifestarse".

En forma breve, lo expuesto puede formularse de la siguiente manera. *Por cuanto la gravitación encorva de igual modo los caminos de todos los cuerpos, podemos considerar la gravitación como la curvatura del espacio — tiempo.* La gravitación es el *alter ego** de la curvatura de la geometría.

Con la curvatura del espacio —tiempo se puede no relacionar nada, salvo la curvatura de los caminos espacio— temporales (las llamadas líneas mundiales**) de todos los cuerpos sin excepción.

Movimiento del perihelio de Mercurio

Hemos realizado unos razonamientos largos, llegando al entendimiento esencialmente nuevo de la gravitación. Desde luego, esto, de por sí, es importante e interesante. Sin embargo, ¿acaso todo ello no nos da nada sustancial y "en la salida" no queda sino aquella misma ley newtoniana, vieja y buena?

Por supuesto, no es así. Se trata no solamente

* Otro yo.

** Se entiende como línea mundial la curva que representa la dependencia de las coordenadas de un punto en movimiento respecto al tiempo. Para el movimiento unidimensional más simple, o sea, el movimiento a lo largo de una recta espacial, la línea mundial representa la variación de la única coordenada en función del tiempo. Durante el movimiento uniforme la línea mundial será una recta; para el movimiento acelerado ésta se encorva.

de una nueva intelección de las viejas verdades, sino también de generalizaciones de principio y de nuevos efectos.

Ya nos hemos referido a que la teoría de Einstein describe de una forma cuantitativa correcta la desviación de los rayos de luz por influjo de la gravitación, como asimismo hemos mencionado el efecto Mössbauer. También merece hacer mención de la explicación exitosa del movimiento del perihelio de los planetas, en particular, de Mercurio. Se tiene en cuenta lo siguiente. El cálculo basado en las leyes de la mecánica newtoniana lleva a la conclusión de que las órbitas de todos los planetas deben ser elipses cuya posición en el espacio es invariable. Ahora bien, las observaciones demuestran que estas órbitas dan una lenta vuelta. Este fenómeno es más evidente para Mercurio, planeta más cercano al Sol el cual, por lo tanto, experimenta el máximo influjo gravitacional. El cálculo que se fundamenta en la teoría de la gravitación de Einstein proporciona una buena descripción cuantitativa de este fenómeno.

Ondas de gravitación

Si se quiere, todo lo que hemos expuesto anteriormente reviste el carácter de correcciones pequeñas. Sin embargo, existe también algo nuevo de principio, lo que deriva de la interpretación einsteiniana de la gravitación. Aquí, en primer lugar, debe destacarse la deducción acerca del carácter finito de propagación de la gravitación.

En la ley newtoniana de la gravitación universal no se dice nada sobre el tiempo de transmisión de la interacción. Se supone implícitamente que ésta se realiza de manera instantánea, por muy grandes que sean las distancias

entre los cuerpos que realizan esta interacción. En general, semejante criterio es típico para los adeptos de la acción a distancia. De la teoría de Einstein se infiere que la gravitación se transmite de un cuerpo al otro con la misma velocidad que una señal luminosa. Si un cuerpo cualquiera se aparta de su lugar, no varía instantáneamente la curvatura del espacio y del tiempo provocada por el mismo. Primero, esto se manifestará en la cercanía inmediata del cuerpo, luego, esta variación abarcará las regiones cada vez más lejanas y, por fin, en todo el espacio se establecerá una nueva distribución de la curvatura correspondiente a la posición variada del cuerpo.

Es aquí donde abordamos el problema que ha provocado y sigue provocando el máximo número de disputas y disensiones, el problema de la irradiación gravitacional.

¿Puede acaso existir la gravitación si no hay masa que lo engendra? De conformidad con la ley de Newton, no puede, incuestionablemente. En su ámbito carece de sentido hasta el planteamiento de semejante pregunta. Sin embargo, en cuanto hemos admitido que las señales gravitacionales se transmiten con una velocidad aunque muy grande, pero, sea como fuese, no infinita, todo cambia radicalmente. En efecto, figúrense que, al principio, la masa que engendra la gravitación, por ejemplo, una bolita, estaba en reposo. Sobre todos los cuerpos alrededor de la bolita actuarán las fuerzas newtonianas ordinarias. Ahora, con una velocidad enorme, apartemos la bolita del lugar inicial. En el primer momento los cuerpos circundantes no percibirán su alejamiento, ya que las fuerzas gravitacionales no varían instantáneamente. Es necesario cierto lapso para que los cambios en la curvatura del espacio tengan tiempo de propagarse por

todos los lados. Por consiguiente, los cuerpos circundantes durante cierto período seguirán experimentando la acción anterior de la bolita aunque la misma ya falta (en todo caso, en el lugar de antes).

Así, pues, resulta que las curvaturas del espacio* adquieren una determinada independencia y que es posible arrancar el cuerpo de aquella zona del espacio donde dicho cuerpo provocó curvaturas, además, esto se hace de un modo tal que estas curvaturas de por sí, aunque sea a grandes distancias, permanecerán y se desarrollarán de acuerdo con sus leyes intrínsecas. ¡He aquí que se tiene la gravitación sin la masa gravitacional! Se puede ir desarollando esta idea. Si obligamos nuestra bolita a oscilar, entonces, como deriva de la teoría de Einstein, sobre el cuadro newtoniano de gravitación se superpone un peculiar "cabrilleo" que no es sino ondas de gravitación. Para imaginarnos mejor estas ondas hay que retornar a nuestro modelo: la película de goma. Si no sólo presionamos con el dedo sobre esta película sino también, simultáneamente, realizamos con éste movimientos oscilatorios, las oscilaciones comienzan a transmitirse por la película dilatada por todos los lados. Esto es, precisamente, la analogía de las ondas gravitacionales. Cuanto más lejos se encuentra de la fuente, tanto más débiles son estas ondas.

Y ahora, en un momento determinado, dejemos de presionar sobre la película. Las ondas no desaparecerán. Se mantendrán independientemente, propagándose por la película cada vez más lejos y provocando en su camino la curvatura de la geometría.

Absolutamente de la misma manera las ondas

---

* Más precisamente, en todos los casos se debe hablar sobre la curvatura del espacio — tiempo.

de la curvatura del espacio —las ondas gravitacionales— también pueden existir independientemente. Semejante conclusión la sacan de la teoría de Einstein muchos investigadores.

Por cierto, todos estos efectos son muy débiles. Así, por ejemplo, la energía liberada durante la combustión de una sola cerilla supera muchas veces la de las ondas gravitacionales irradiadas en el mismo plazo por todo nuestro sistema solar. Sin embargo, lo que aquí tiene importancia no es el aspecto cuantitativo, sino el propio principio.

En un tiempo, los círculos científicos quedaron perturbados por la comunicación de que el investigador norteamericano Weber logró registrar las ondas gravitacionales. De principio, sus instalaciones fueron muy sencillas: bajo la tierra se instalaban cilindros macizos de aluminio, de una tonelada de peso, aproximadamente. Si —razonaba Weber— una onda gravitacional choca contra este cilindro, éste debe comenzar a vibrar. Con el fin de evitar efectos casuales, se tomaban dos cilindros instalados a una distancia considerable uno del otro y se tenían en cuenta solamente aquellas de sus oscilaciones que coincidían. Sin embargo, como demostraron las mediciones más exactas efectuadas, en particular, en la Universidad de Moscú, Weber, a todas luces, no logró suprimir las influencias "parásitas". Los receptores de las ondas gravitacionales, por ahora, no alcanzaron todavía la sensibilidad necesaria.

Los partidarios de las ondas gravitacionales —y a éstos, por lo visto, pertenece ahora la mayoría— presagian otro fenómeno sorprendente: la transformación de la gravitación en tales partículas como los electrones y positrones (deben nacer por parejas), protones y antiprotones, etc. (Ivanenko, Wheeler y otros).

El cuadro debe tener el siguiente aspecto, aproximadamente. La onda de gravitación llegó hasta cierto sector del espacio. En un momento determinado esta gravitación disminuye bruscamente, a salto, y al mismo tiempo allí aparece, digamos, el par electrón-positrón. Lo mismo se puede describir también como la disminución a salto de la curvatura del espacio con el nacimiento simultáneo de un par.

Hay muchas tentativas de traducir lo expuesto al lenguaje mecánico-cuántico. En la consideración se introducen las partículas gravitones que se ponen en correspondencia con la imagen no cuántica de la onda gravitacional. En la literatura física está en boga el término "transmutación de los gravitones en otras partículas", con la particularidad de que estas transmutaciones, o sea, las transformaciones recíprocas, son posibles entre los gravitones y, de principio, cualesquiera otras partículas. Es que no existen partículas insensibles a la gravitación.

Supongamos, incluso, que estas transformaciones son poco probables, es decir, suceden muy raras veces, sin embargo, a escala cósmica, pueden revestir un carácter de principio.

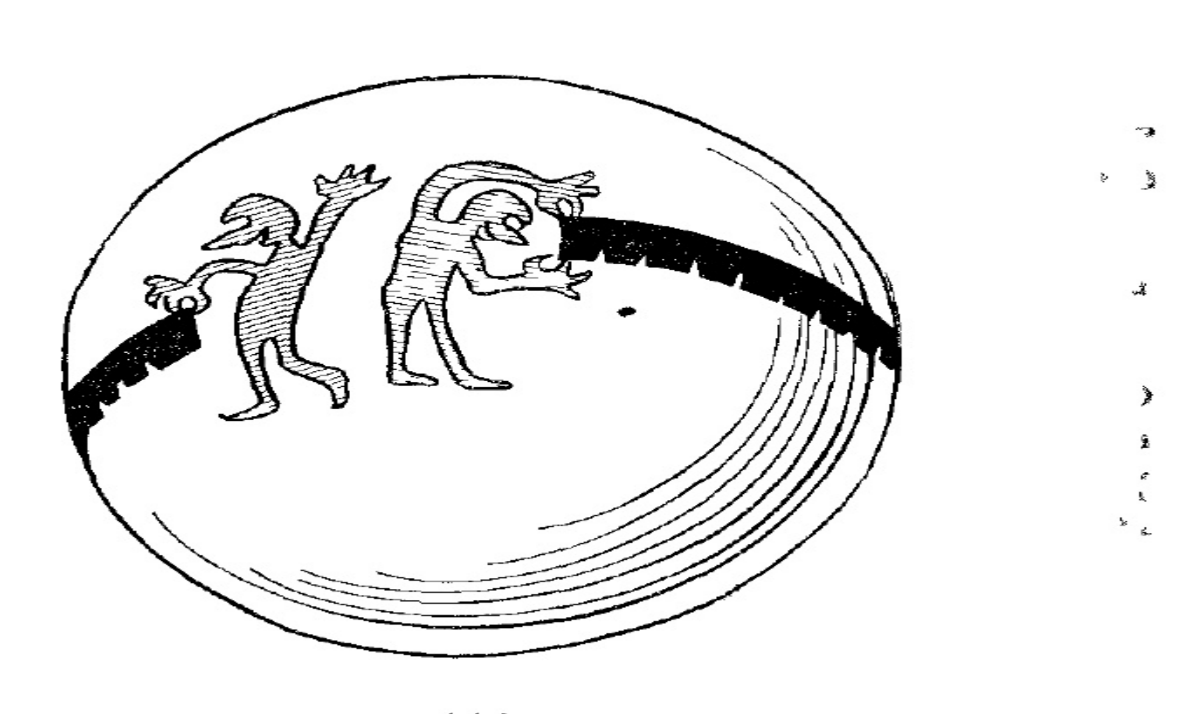
Por lo demás, no se conoce hasta la fecha si semejantes fenómenos, en general, tienen lugar en la realidad.

El Universo, finito, pero ilimitado

Con anterioridad, al discutir las transmutaciones gravitacionales de las partículas hemos hecho mención de la cosmología. Y aquí no se puede dejar de señalar que la teoría de Einstein resultó ser estímulo extraordinario para el desarrollo de las concepciones cosmológicas, precisamente. El impulso que dio esta teoría despertó a la vida ideas hasta entonces inconcebibles.

renovando, literalmente, la más antigua de las ciencias sobre la naturaleza, la cosmología.

El Universo... ¿Qué es lo que sabemos sobre éste? Es que nuestros instrumentos sólo nos permiten echar un vistazo a un "rinconcito" suyo. Miríadas incontables de estrellas se encuentran tan lejos de la Tierra que nuestros telescopios ópticos y los radiotelescopios no pueden "extenderse" hasta ellas. Mas el pensamiento llama a los investigadores cada vez más lejos. ¿Qué se halla en lontananza, tras la margen de lo indagado? Las conjeturas basadas en las "consideraciones generales" de que "allí" todo se despliega hasta el infinito siguiendo el principio de "etcétera" producían, de ordinario, un efecto calmante y no servían de aliciente a la fantasía. pero he aquí que en 1917 pareció como si una racha hubiera sacudido el mundo científico. Alberto Einstein intervino con la teoría del Universo finito. ¡Universo finito! ¿Y qué se encuentra allá, por otro lado de la frontera? ¿Qué resulta, entonces... que allá "termina el espacio"? ¿Acaso es posible concebir que...?



Por lo demás, vamos a interrumpir el torrente de preguntas muchas de las cuales, efectivamente, se desplomaron sobre los físicos. Tratemos de analizar en qué, en esencia, consiste la afirmación sobre el carácter finito del espacio. También aquí nos volverá a ayudar nuestro modelo: la película con sus "habitantes bidimensionales" que habíamos introducido en su tiempo para explicar la curvatura del espacio. Tácitamente, habíamos supuesto que esta película se extiende ilimitadamente lejos a lo ancho y tan sólo en algunos lugares se encorva, precisamente allí donde se encuentra la "materia", es decir, los cuerpos que engendran la gravitación. En nuestro modelo el "mundo" fue infinito. Bueno, ¿y si esta materia está distribuida de una forma más o menos uniforme? En este caso, la curvatura, también aproximadamente uniforme, debe estar en todas las partes. ¿Cómo se puede figurar una película que, por doquier, tiene igual curvatura? No hay nada más fácil, ¡basta recordar el globo aéreo infantil común y corriente!

Ahora intentemos de nuevo "comprender la situación" de aquellos investigadores bidimensionales con los cuales nuestra fantasía pobló la película. Para ellos la superficie del globo representa todo el espacio. En efecto, si hubieran organizado una expedición, ordenándole estrictamente ir siempre en una misma dirección, "siguiendo una recta" (escribimos las últimas palabras entre comillas para hacer recordar que la propia "recta" ¡se encorva!), entonces esta expedición tarde o temprano, para el asombro de sus organizadores y los participantes, habría regresado al punto inicial, sólo que por otro lado. Cada vez nuevas expediciones podrían ponerse en camino. Pero cualquiera que sea la dirección elegida todas ellas, después de haber recorrido un círculo cerrado, deberían regresar

al punto de partida. ¿Qué deducción convendría que sacaran los sabios bidimensionales? La única: "Nuestro Universo —dirían— no se extiende hacia el infinito, sino tiene dimensiones finitas. Pero al mismo tiempo es ilimitado, ya que no había expedición alguna que hubiera descubierto algo semejante al límite del Universo". ¡Ilimitado, pero no infinito! Precisamente con estas palabras definió Einstein en su teoría nuestro espacio. En general, el sentido de estas palabras es el mismo que en el modelo: si se imagina una nave cósmica que vuela siempre en dirección recta, ésta, en fin de cuentas, debe retornar al punto de despegue (por supuesto, si no se lo impide el choque con otros cuerpos celestes). Pero lo expuesto se refiere no sólo a la nave cósmica: lo mismo sucederá también con el más rápido de los viajantes, el rayo de luz. Al moverse en un espacio encorvado por la gravitación, el rayo, después de atravesar las inabarcables lejanías del ilimitado, mas, a pesar de todo, finito espacio, se "encerrará en sí mismo".

El Universo en expansión

Sin embargo, con lo anterior no hemos agotado todavía el tema: la teoría de la gravitación de Einstein no solamente da la posibilidad de hablar acerca del carácter finito del Universo, sino también conduce a una deducción aún más sorprendente: deducción sobre la expansión del Universo.

Por primera vez esta deducción —frente a la cual el propio Einstein tomó una actitud escéptica— fue hecha por el físico soviético A. Friedman.

La teoría de Friedman se basa en la siguiente tesis principal: en su totalidad el Universo es

uniforme e isótropo. Esto significa que ninguno de los grandes sectores del Universo se distingue por sus propiedades de los demás. Todas las direcciones en el Universo son completamente equivalentes. La densidad media de la materia es idéntica en todos los lugares.

Con esta suposición las ecuaciones gravitacionales de Einstein, de una forma absolutamente unívoca, llevan a la conclusión de que el Universo no puede ser estacionario. Éste se expande de modo que todas las acumulaciones estelares —las galaxias— se fugan unas de otras.

Recuerden nuestro modelo bidimensional del Universo finito, el globo infantil. Este globo, el Universo, está en constante expansión, de modo que las distancias entre cualesquiera de sus puntos aumentan. Y téngase, además, en cuenta que este aumento será tanto más rápido cuanto más lejos estén situados los puntos unos de otros, pues incrementa cada centímetro del segmento de la curva que une estos puntos. De seguro, los astrónomos bidimensionales habrían podido averiguarlo.

Si se mira a la estrella que se aleja, su espectro se desplazará al lado de las ondas largas. Todas las líneas en este caso se tornan “más rojas”. (Este fenómeno lleva el nombre de corrimiento hacia el rojo y es debido al efecto Doppler; el corrimiento es tanto más perceptible, cuanto mayor es la velocidad).

Lo más remarcable es que nuestros astrónomos terrestres fueran capaces de descubrir este fenómeno. El astrónomo norteamericano estableció que todas las islas estelares del Universo, las galaxias, se alejan de la nuestra, con la particularidad de que cuanto más lejos de nosotros se encuentra la galaxia, tanto mayor es el corrimiento de las líneas espectrales de sus ondas luminosas y, por consiguiente, tanto mayor es la

velocidad relativa del movimiento de las galaxias. Dicha velocidad u satisface la simple ley: $u = Hr$, donde r es la distancia hacia la galaxia, y H, la constante de Hubble.

En 1963 fueron descubiertos los objetos cuasiestelares más alejados de nosotros: los cuasares. La principal particularidad distintiva de los cuasares es su colosal intensidad luminosa que supera centenares de veces la luminosidad de las más brillantes galaxias. Algunos cuasares se alejan de nuestra Galaxia a unas velocidades fantásticas del orden de 240 000 km/s, o sea, cuatro quintos, aproximadamente, de la velocidad de la luz. En este caso la irradiación ultravioleta de los cuasares se percibe como luz visible.

La ley de Hubble deriva directamente de la teoría de Friedman, con la particularidad de que H decrece en razón inversa al tiempo y, por lo tanto, la velocidad de expansión del mundo debe disminuir.

Así, pues, convergieron el maravilloso vaticinio teórico y el admirable descubrimiento experimental. No es de extrañar que el mundo científico —y no sólo éste— quedó literalmente conmovido por la novedad y la audacia de las ideas cosmológicas de Einstein — Friedman. Es la palabra "revolución" la que, sin concesión alguna, puede emplearse para caracterizar lo acaecido en este caso.

El pasado y el futuro del Universo

El hecho de que el Universo se expande (o, más exactamente, el sector del Universo en que nosotros vivimos) es absolutamente indiscutible. Es un hecho experimental directo. También la teoría lleva a la misma conclusión. ¿Pero qué será del Universo en el futuro? ¿Cuál había sido éste en el pasado? Y, finalmente, ¿es finito o infinito el Universo en la realidad?

No hay respuestas definitivas a estas preguntas, sin embargo, ya hoy en día se pueden decir muchas cosas si se admite la validez de la hipótesis sobre la uniformidad e isotropía del Universo.

Hablaremos, primero, sobre el futuro del Universo. Por muy extraño que parezca, precisamente en este campo existe una mayor determinación. Sólo existen dos posibilidades y se trata de hacer una opción entre éstas.

De conformidad con la teoría todo depende de la relación entre la densidad media ρ del Universo en el momento dado de tiempo y cierta densidad $\rho_{cr} = \frac{3}{8\pi} \frac{H^2}{\varkappa}$, donde H es la constante de Hubble en el momento dado de tiempo, y $\varkappa$, la constante gravitacional*.

Si ρ es menor que ρ_{cr}, la expansión del Universo nunca cesará. La velocidad de fuga de las galaxias disminuirá paulatinamente, pero la expansión jamás se sustituirá por la compresión. Las galaxias se apartarán a unas distancias inconcebiblemente enormes, y nuestra isla estelar resultará completamente perdida en el inmeso océano del espacio.

En cambio, si ρ es mayor que ρ_{cr}, entonces, con el correr del tiempo, la expansión del Universo se sustituirá por la compresión, y el lugar del corrimiento rojo lo ocupará el violeta. Por ahora, sin embargo, es imposible predecir cuándo tendrá lugar este fenómeno, si en general, éste puede ocurrir.

De este modo, para conocer el futuro del Universo es necesario saber la densidad media de la materia en su interior. La densidad $\rho_{cr} = 2 \cdot 10^{-21}$ g·cm³ se conoce, por cuanto se pueden medir

---

* De hecho, la relación entre ρ y ρ_{cr} viene determinada por la relación entre las energías potencial y cinética del Universo.

con suficiente precisión tanto la constante de Hubble, como la constante de gravitación.

La dificultad principal reside en la determinación de ρ. Es preciso conocer la masa de la materia (tanto de la sustancia, como de la radiación) contenida no sólo en las estrellas, sino también en el espacio interestelar de la parte visible del Universo. Las evaluaciones de que disponemos en la actualidad son sumamente contradictorias. Según unos datos ρ es menor que ρ_{cr}, mientras que según otros ρ es mayor. No se han obtenido conclusiones definitivas.

La determinación de la densidad de la materia desempeña un papel importantísimo también en el otro aspecto. La relación entre ρ y ρ_{cr} de la cual depende el futuro del Universo es determinante para la estructura espacial del Universo como un todo único. Para ρ mayor que ρ_{cr} la curvatura media del mundo es positiva y el Universo es finito. Para ρ menor que ρ_{cr} el Universo es infinito. Por lo tanto, la teoría de la gravitación de Einstein demuestra tan sólo que nuestra antigua convicción en el carácter infinito del Universo bien puede no corresponder a la verdad, sin embargo ésta no afirma tajantemente que el mundo se cierra en sí mismo.

Ahora veremos qué se puede decir sobre el pasado del mundo. En cierto período muy remoto el Universo hubiera debido estar comprimido en un volumen muy pequeño. En este momento la densidad de la materia fue infinitamente grande. Si tomamos este instante por el punto de referencia para la lectura del tiempo ($t = 0$), entonces, al conocer la constante de Hubble, se puede evaluar el tiempo de expansión del Universo. Dicho tiempo resulta ser relativamente pequeño: tan sólo de 16 ó 17 mil millones de años. No es mucho según la escala astronómica.

¿En qué estado se encontraba la materia del

Universo en aquel momento? ¿De qué modo, a partir de esta sustancia superdensa se engendró nuestro Universo con sus estrellas y acumulaciones estelares? Y, finalmente, ¿qué le había pasado al Universo antes de este instante?

Actualmente, no hay quien pueda dar respuesta completa a todos estos interrogantes. Sin embargo, también aquí ya se perfilan soluciones posibles.

Es evidente que para el estado superdenso de la sustancia en las condiciones iniciales del Universo no únicamente la gravitación, por sí sola, debía ser esencial. También otras fuerzas tenían que desempeñar un papel notorio. Ésta es la razón por la cual tan sólo después de conocer aquéllas podemos dedicar algunas palabras a las hipótesis existentes en este campo.

Nacimiento de las galaxias

Detengámonos ahora en el problema de la formación de las galaxias. Difícilmente se puede dudar de que en el estado superdenso del Universo su densidad y temperatura fueran idénticas en todos los sectores del espacio. ¿Qué fue, entonces, lo que dio lugar a la distribución en sumo grado no uniforme de la materia en el Universo y a su conglomeración en galaxias y estrellas?

Actualmente se cuenta con cerca de 10^{14} acumulaciones estelares, galaxias, cada una de las cuales se compone de centenares de miles de millones de estrellas. Las dimensiones de las galaxias son enormes. Nuestra Galaxia, por ejemplo (¡qué se escribe con mayúscula!), es una formación parecida a una lente biconvexa de cerca de 100 000 años-luz de diámetro y de 1000 años-luz de espesor, aproximadamente (un año-luz equivale a la distancia que la recorre en un año,

o sea, 10^{13}km). Las distancias entre las galaxias superan considerablemente sus dimensiones. La distribución de las galaxias en el firmamento no es uniforme. Por regla general, éstas forman acumulaciones cuyo tamaño alcanza 10 millones de años-luz.

La mayoría de los científicos considera que la formación de las galaxias es el resultado de la condensación gravitacional a la que nos hemos referido al discutir la teoría de la formación de los planetas. Pero la formación de las galaxias comenzó mucho tiempo antes que la de los planetas y a temperatura completamente diferente, además, se llevó a cabo no a partir de nubes de gas y polvo, sino de hidrógeno.

En las etapas tempranas de la evolución del Universo, cuando su temperatura superaba 3000 K, toda la materia constaba, principalmente, de electrones, protones y fotones. A temperaturas tan altas no se podían formar átomos neutros, puesto que la energía cinética del movimiento relativo de los electrones y protones fue mayor que la de enlace de estas partículas.

La condensación gravitacional de las estrellas que comenzó después de la formación del hidrógeno es consecuencia de la inestabilidad gravitacional. Las compresiones insignificantes del gas producidas por causas fortuitas comienzan a crecer sucesivamente, atrayendo hacia su seno la sustancia circundante. Como resultado, aumenta la densidad de la sustancia a pesar de que la expansión del Universo en su totalidad conduce a la disminución de la densidad media. En una etapa determinada, el aumento sucesivo de la densidad de algunas porciones de las nubes de gas originadas como consecuencia de la inestabilidad gravitacional tiene lugar debido a las colisiones de los átomos unos con otros. Durante el movimiento caótico de los átomos

siempre puede ocurrir que uno de éstos, que se mueve con mayor rapidez, alcanza al átomo cuyo movimiento es lento, chocando contra éste. Debido a ello aparece una microcompresión hacia la cual con velocidades cada vez mayores, se precipitan otros átomos, atropellándose mutuamente. Según la expresión de Ya. B. Zeldóvich, se produce algo parecido a un "amontonamiento" caótico que se observa, en ocasiones, durante los accidentes en las autopistas. Las zonas de densidad elevada poco a poco se acrecientan y, finalmente, como lo demuestran los cálculos, se forma una capa plana de sustancia que guarda semejanza con una hojuela. Esta configuración está relacionada con el hecho de que se destaca una dirección prefijada por la del movimiento de las partículas que chocaron como primeras.

Más tarde, estas capas de sustancia se disgregan en partes aisladas de menor masa, las protogalaxias, las cuales, a su vez, se disocian en estrellas. La mayor dificultad consiste en averiguar las causas de la rotación de las galaxias. Pero ya hoy en día se tienen motivos para suponer que dicha rotación no fue una cualidad inherente y prístina de la materia del Universo, sino surgió en el proceso de la condensación gravitacional.

En lo sucesivo, durante la evolución de las estrellas, indudablemente, a la par de las fuerzas gravitacionales comenzaron a desempeñar un papel considerable también las nucleares y otras. Pero, por ahora, este problema tampoco lo discutiremos.

¿Y qué pasó con el Universo antes de haber comenzado la expansión?

De principio, es más sencillo dar la respuesta para un Universo finito. Es que en este caso la expansión, hablando en general, puede reemplazarse por la compresión, y el estado del Uni-

verso en el momento $t = 0$ debe considerarse como resultado de la compresión anterior. Entonces llegaremos a la hipótesis del Universo pulsatorio. El Universo está en *sempiterna pulsación* (se expande y se comprime) con un período que por ahora no nos está dado a conocer. Éste es el cuadro más simple y accesible a nuestro raciocinio de evolución del Universo que existe eternamente. Pero, en semejantes cuestiones no debe ser el criterio de sencillez el que decide.

Aquí, como siempre en la física, el voto decisivo pertenece al experimento. Sí, no nos hemos equivocado, precisamente al experimento, aunque puede parecer que es posible realizarlo, tal vez, *sólo en* el caso de hacerse con la *máquina* del tiempo que permitiera echar un vistazo al pasado muy remoto.

Investigaciones muy interesantes llevadas a cabo, en particular, por el académico Ya. B. Zeldóvich y sus discípulos demuestran que las consecuencias de los procesos que se desarrollaban impetuosamente en las etapas más tempranas de la evolución del Universo deben manifestarse también en la actualidad. Más tarde volveremos a este problema.

Un gran paso en el camino del conocimiento de la naturaleza

Puede surgir el deseo de preguntar: si la teoría de la gravitación de Einstein es tan compleja, si las deducciones cosmológicas derivadas de ésta tienen, en grado considerable, carácter preliminar y, con frecuencia, también fantástico, si, finalmente, esta teoría, por ahora, no ha enriquecido en nada la técnica, entonces, ¿qué es aquello que obliga a los científicos más destacados de nuestro tiempo a hablar sobre esta teoría como sobre el "logro más relevante del intelecto humano"? ¿Qué es lo que durante más

de sesenta años atrae a esta teoría la atención permanente de los físicos, filósofos, astrónomos, así como de un número enorme de personas intelectuales? Se sobreentiende que no se trata tan sólo del "buen gusto de la humanidad". Ni tampoco de la portentosa belleza de sus principios fundamentales.

Lo primordial es el descubrimiento de nuevos nexos físicos, extraordinariamente complejos, cuya existencia ni siquiera sospechaban antes los investigadores de la naturaleza.

Apoyándonos en la teoría de Einstein entramos en un nuevo campo que reviste para el hombre un interés sin parangón. Aquí, por primera vez en el ámbito de una teoría física exacta nos acercamos a la cognición de lo infinito. Por primera vez, el hombre comenzó a percibir el aliento del Universo no recurriendo a revelaciones poéticas, sino hallándose en las vías del conocimiento exacto. Sin la teoría de Einstein la mayoría de los problemas a los cuales nos referimos, ni siquiera se podía plantear.

Unos cien años atrás, al descubrir la relación entre los fenómenos luminosos y magnéticos, Faraday, lleno de entusiasmo, escribió que "había logrado imantar la luz e iluminar la línea magnética de fuerza".

Nosotros podemos decir, sin reserva, que la teoría de Einstein arrojó una nueva luz a la comprensión científica del mundo y que el "magnetismo" de sus ideas estableció su dominio sobre los científicos naturalistas y sigue dominándoles.

Y sea cual fuere el ulterior desarrollo de nuestra comprensión de la gravitación, la obra genial de "Newton del siglo veinte" siempre nos cautivará con su audacia sin par, quedando para siempre como un gran paso en el camino del conocimiento de la naturaleza.

Yo canto el cuerpo eléctrico.
Walt Whitman, *Hojas de hierba*

CAPÍTULO III

FUERZAS ELECTROMAGNÉTICAS

1. ¿Qué fuerzas llevan el nombre de electromagnéticas?

Los niños y los científicos

Está claro que el libro que se encuentra sobre la mesa no se hundirá a través de ésta, a pesar de la atracción de la Tierra. Todo el mundo conoce, además, que el libro no se deslizará incluso en el caso de inclinar un poco la mesa. De ordinario, a nadie le asombra la capacidad de los pies de aumentar bruscamente nuestra velocidad si por detrás de la cerca sale un perro rabioso. Por fin, poca gente se da el trabajo de reflexionar sobre las causas debido a las cuales el libro, la mesa, la piedra y otros cuerpos sólidos mantienen intacta su forma.

Nos encontramos con semejantes hechos a cada paso y estamos acostumbrados a éstos desde la infancia. Los mismos llegan a ser tan evidentes que nosotros no sentimos, en absoluto, la necesidad de explicarlos. En la mayoría de los casos esto tampoco se requiere para orientarnos con seguridad en el mundo que nos rodea. Siempre es importante saber qué ocurrirá, pero muchas veces carece de importancia conocer por qué las cosas ocurren de tal modo y no de otro.

Es evidente que sólo en la más tierna infancia



nos pueden inquietar las cuestiones de por qué alrededor de nosotros tienen lugar los fenómenos más comunes y corrientes. Sin embargo, es completamente superior a las fuerzas de un niño resolver tales problemas, por otra parte, la persona adulta muy raras veces vuelve a las cuestiones las cuales renunció a solucionar en la infancia. Según las palabras del físico inglés Perry, el afán de explicar el comportamiento de las cosas "sencillas" resulta oculto lejos en las profundidades de la conciencia, y atraen la atención fenómenos inesperados e insólitos. La curiosidad respecto a los fenómenos más acostumbrados es inherente solamente a los niños y a los científicos.

Esta es la razón de que, en muchos aspectos, es más fácil, por ejemplo, relatar sobre las propiedades inusitadas del espacio y del tiempo reveladas en la teoría de la relatividad que explicar por qué la piedra conserva su forma. En el primer caso, inmediatamente, se despierta nuestro interés por el tema, mientras que el segundo hecho es tan acostumbrado que su explicación, en

el acto, corre el riesgo de suscitar nada más que aburrimiento.

Pero, en la realidad, dista mucho de ser sencillo contestar a la pregunta sobre las causas de los fenómenos que se hicieron habituales, enumerados al principio de este capítulo. Los intentos de llegar a comprenderlos nos llevarán muy lejos. Hablando con propiedad, tan lejos como se extienden los límites hasta los cuales ha avanzado hoy en día la ciencia. Sin internarnos tanto en la materia, por ahora, sólo veremos, a base de un ejemplo, aunque sea el inicio de la cadena de preguntas las cuales se planteará, inevitablemente, cualquier persona que trate de percatarse bien de la explicación que se da a los hechos cotidianos. Hechos que hasta da vergüenza denominar con un término científico tal como fenómenos físicos.

La fuerza de elasticidad y sus "familiares"

Ahora el lector tiene delante de sí en una mesa un libro. Sobre este libro actúa la fuerza de la gravedad. Sin embargo, a pesar de esta acción el libro no cae. ¿Por qué? El hombre poco versado en las ciencias contestará: "No le deja hacerlo la mesa". Pero esta frase no es una explicación, sino la mera constatación del hecho.

El iniciado en la física escolar irá más lejos. Sobre el libro, dirá él, actúa una fuerza por parte de la mesa la cual, precisamente, equilibra la fuerza de la gravedad. La primera fuerza lleva el nombre de fuerza de elasticidad, ésta aparece debido a un pandeo de la mesa imperceptible para el ojo y provocada por el libro. Pero dudamos ya, que el alumno pueda contestar a la pregunta de por qué durante el pandeo

de la mesa se engendra la fuerza de elasticidad.

También nosotros, los autores y el lector, vamos a interrumpir en este punto la cadena de preguntas y respuestas y sólo dejando atrás muchas páginas volveremos a esclarecer la causa de la aparición de las fuerzas de elasticidad. Existen motivos sumamente serios para proceder de esta forma. Se trata de que las fuerzas de elasticidad tienen origen común con otras muchas fuerzas, poseen numerosos familiares y, en este respecto, no recuerdan, en absoluto, las fuerzas de la gravitación universal, para las cuales la ciencia, hasta la fecha, no logró hallar ni siquiera a un pariente más lejano.

Las fuerzas de elasticidad que dan la posibilidad a los sólidos conservar su forma impiden la variación del volumen de los líquidos y la compresión de los gases; las fuerzas de rozamiento que frenan el movimiento de los sólidos, de los líquidos y de los gases, y, finalmente, las fuerzas de nuestros músculos: todas estas fuerzas son miembros de una misma familia numerosa. Todas éstas tienen naturaleza común y procedencia común: *son fuerzas electromagnéticas*. La naturaleza proporcionó a las fuerzas electromagnéticas el más vasto campo de actividad. En la vida cotidiana, a excepción de la atracción hacia la Tierra y las mareas, sólo nos encontramos con los diferentes tipos de interacciones electromagnéticas, sí, solamente con éstas, a menos que no se cuentan las fuerzas nucleares las cuales hemos aprendido a aprovechar relativamente hace poco. En particular, la fuerza elástica del vapor también reviste naturaleza electromagnética.

Ésta era la causa de que, de hecho, la sustitución del "siglo de vapor" por el "siglo de electricidad" significó, únicamente, que la época en que no habíamos sabido gobernar las fuer-

zas electromagnéticas se reemplazó por otra en que aprendimos a manejarlas según nuestro juicio.

Las fuerzas electromagnéticas nos permiten ver el libro que usted está leyendo, pues la luz es una de las formas de las interacciones electromagnéticas. La propia vida sería inconcebible sin estas fuerzas. Como demostraron los vuelos de los cosmonautas, un ser vivo y hasta el hombre, son capaces de existir durante un tiempo prolongado en estado de imponderabilidad. Sin embargo, si por un instante se interrumpiese la acción de las fuerzas electromagnéticas, inmediatamente desaparecería la vida.

Tanto durante la interacción de las partículas en los sistemas más compactos de la naturaleza — en los núcleos atómicos—, como durante la acción recíproca de los cuerpos cósmicos a las fuerzas electromagnéticas pertenece un papel relevante, mientras tanto las fuerzas nucleares y gravitacionales son esenciales tan sólo a escala muy pequeña, o bien, a escala cósmica. La estructura de la envoltura atómica, la concatenación de los átomos en moléculas y la formación de trozos de sustancia vienen determinadas solamente por las fuerzas electromagnéticas. Es difícil y casi imposible señalar un fenómeno que no esté relacionado con la acción de estas fuerzas. En correspondencia, es difícil hasta enumerar toda la diversidad de sus manifestaciones. Por ahora, estamos muy lejos de nombrar todas éstas.

¿Por dónde empezar?

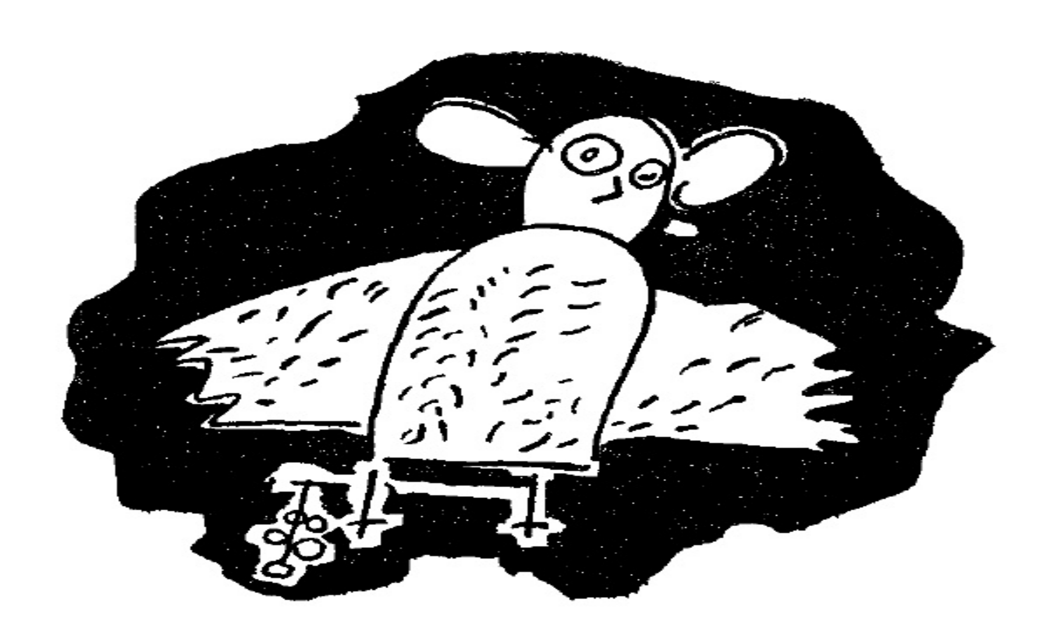
Después de lo expuesto es fácil darse cuenta de que, a lo mejor, no es racional entablar el conocimiento con una familia tan grande, examinando atentamente uno de sus miembros, las

fuerzas de elasticidad. Pero, entonces, ¿por dónde empezar? Hemos dado el nombre de electromagnéticas a una multitud de las más diversas fuerzas. ¿Qué quiere decir esto? Es que el mero hecho de nombrar no significa todavía explicar cosa alguna*. Más aún, de ordinario, el nombre de fuerzas eléctricas y magnéticas lo dan a algo completamente distinto. Se denomina fuerza de atracción o de repulsión eléctrica la fuerza de interacción de los cuerpos electrizados. Por ejemplo, la fuerza que hace atraerse pequeños pedacitos de papel al peine, el cual hemos pasado varias veces por los cabellos. Y por fuerza magnética se entiende, habitualmente, aquella que actúa por parte del imán sobre un conductor con corriente eléctrica o las fuerzas de interacción de los imanes.

Hasta el momento, sólo hemos enunciado la tesis de que la gran cantidad de interacciones diversas por su forma tienen naturaleza común. Evidentemente, en primer lugar tenemos que contestar a la siguiente pregunta: ¿en qué, en fin de cuentas, consiste el carácter común de las interacciones enumeradas? O bien, hablando con otras palabras: ¿qué fuerzas se llaman electromagnéticas?

En adelante, no nos asustará incurrir en algunas repeticiones, teniendo presente la sabia observación de la docta Lechuza, uno de los personajes del maravilloso libro "Winnie-el-Pooh" de A. Milne, acerca de que existen cosas que se pueden explicar tranquilamente dos veces, sin

* La verdad es que, lamentablemente, entre muchas personas es tan arraigada la costumbre de ver la explicación en una sola palabra, si ésta es lo suficientemente contundente, que basta decir: "aquí actúa la electricidad", para satisfacerles en el acto, aunque sólo después de ello es el justo tiempo de abordar la auténtica explicación.



correr el riesgo de que alguien comprenda de qué habla usted. En el mencionado libro esta observación se refería a la explicación de qué es la "Necesaria o Correspondiente Musculatura Dorsal", en cuanto a nosotros, discutiremos cosas no menos complicadas.

Si tratamos de contestar de un modo más conciso a nuestra principal pregunta, se puede decir de la siguiente manera: *la acción de todas las fuerzas enumeradas se basa en las mismas leyes generales: las leyes de interacción de los cuerpos eléctricamente cargados.* En fin de cuentas, las fuerzas enumeradas están condicionadas por la interacción entre las partículas elementales portadoras de cargas eléctricas. Ahora bien, la interacción entre las partículas cargadas se lleva a cabo por medio del campo electromagnético. Precisamente por esta causa las fuerzas en cuestión se denominan electromagnéticas. Si como por encanto hubieran desaparecido todas las cargas eléctricas, entonces, en el acto, se pondría fin a la existencia de las fuerzas de elastidad, de rozamiento, etc. Se descompondrían en sus partes integrantes no sólo los cuerpos, sino también los átomos que los forman.

Nuestro objetivo más próximo consistirá en conocer las leyes principales de las interacciones electromagnéticas. Solamente después de pasar por esta etapa. estaremos en condiciones de orientarnos en toda la riqueza de las manifestaciones de las fuerzas electromagnéticas y comprender la razón por la cual estas fuerzas están tan ampliamente difundidas en la naturaleza y son tan variadas.

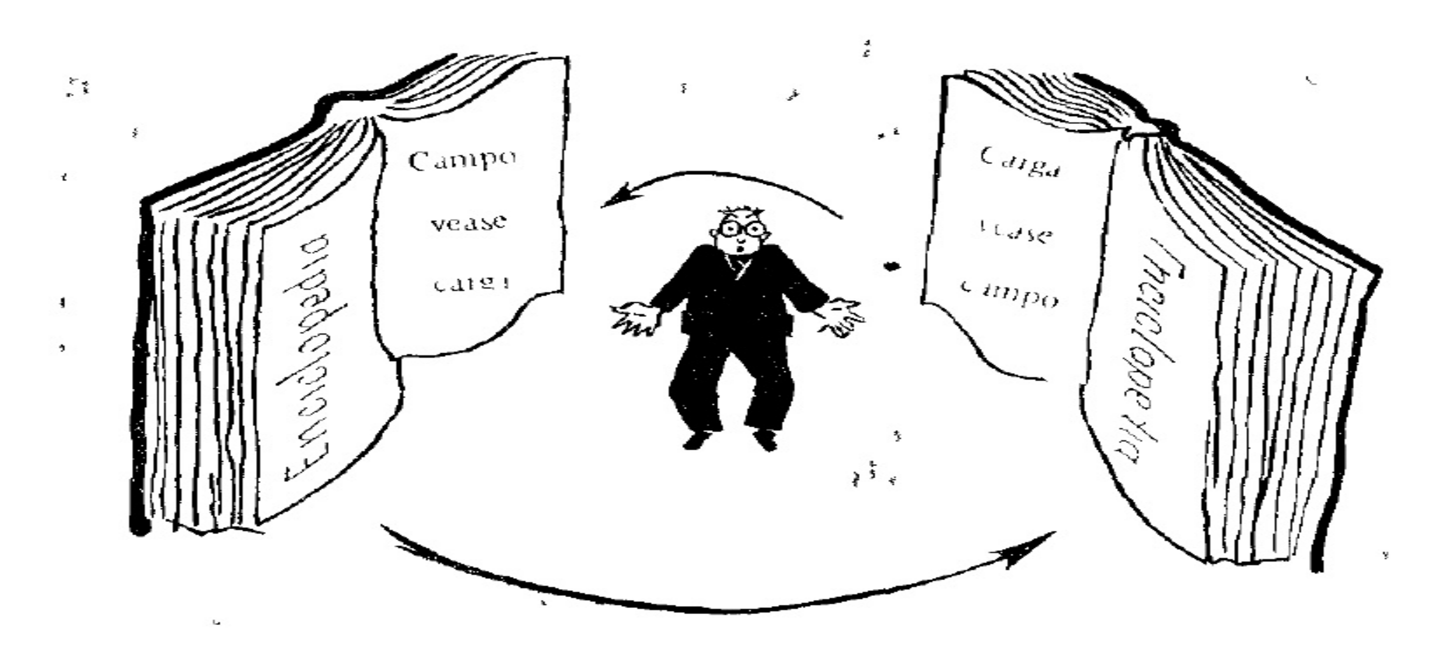
2. ¿Qué es la carga eléctrica?

Dificultades en las definiciones

¿Qué es la carga eléctrica? Si abrimos la Gran Enciclopedia Soviética podremos leer: "La carga eléctrica es la propiedad de algunas partículas (electrones, protones, positrones, algunos tipos de mesones) consistente en que éstas siempre están ligadas con el campo eléctrico (electromagnético) y experimentan acciones determinadas de los campos electromagnéticos externos". Pero ¿qué es el campo electromagnético? Abriremos la Enciclopedia en el lugar correspondiente. Ésta dice lo que sigue: "El campo electromagnético es el campo físico de las cargas eléctricas en movimiento que realiza la interacción entre éstas". Se origina una situación bien conocida: la serpiente se muerde su propia cola. La carga es aquello que está ligado con el campo electromagnético, y el campo, aquello que está relacionado con la carga.

Y no tenemos que ver aquí con un descuido de la redacción. La dificultad realmente existente con la cual se encuentra cada aquel que trate de dar una definición breve de estos conceptos fundamentales. El asunto reside en que aquí, en general, es imposible formular unas definiciones breves y satisfactorias en todos los aspectos. Lo primordial es precisamente perca-

tarse de esta circunstancia. Nos hemos acostumbrado a encontrar explicaciones comprensibles a nosotros para formaciones y procesos sumamente complejos, algo como el átomo, la termodifusión, la reacción nuclear en cadena, etc. Ahora bien, en la realidad, precisamente las formaciones tan complejas, como, por ejemplo, es el átomo, *no* representan tantas dificultades para su explicación. En cambio, los conceptos más fundamentales, los elementales, que ya no pueden desmembrarse en más simples y que, de acuerdo con los datos de la ciencia, para el día de hoy carecen de cualquier mecanismo interno, estos conceptos no son susceptibles de explicarse concisamente, de una manera satisfactoria. En particular, si los objetos no se pueden percibir directamente por nuestros sentidos. La carga eléctrica y el campo electromagnético pertenecen, precisamente, a estos conceptos fundamentales. Cuando estos conceptos se dan a conocer en la escuela, con frecuencia ocu*rre lo siguiente:* al principio éstos, simplemente, no se comprenden, luego, los alumnos se suelen acostumbrar a los propios conceptos, utilizán-



dolos sin darse cuenta de toda la profundidad de su contenido.

La situación en este ámbito es tan complicada que ya relativamente hace poco tiempo, a mediados del siglo pasado, incluso las cabezas más destacadas de su época eran capaces de sostener las ideas más asombrosas respecto a la esencia de la electricidad. Así, por ejemplo, Hegel consideraba que la electricidad es "la propia ira, la propia rebelión del cuerpo", su "iracunda autoidentidad" que se "manifiesta en cada cuerpo cuando éste se somete a irritación" ("Filosofía de la naturaleza").

Carga eléctrica y partículas elementales

Primeramente, intentaremos esclarecer no la cuestión de *qué es la carga eléctrica*, sino la de qué se oculta tras la afirmación: *el cuerpo dado o la partícula tienen carga eléctrica*. Es casi lo mismo, pero no del todo, y, tal vez, lo segundo es más sencillo para la comprensión.

Actualmente, no es secreto para nadie que todos los cuerpos de la naturaleza están construidos a partir de pequeñísimas partículas las cuales —de conformidad con los conocimientos de que disponemos hoy en día— no se pueden dividir más y que, debido a esta causa, se suelen denominar elementales. No tenemos necesidad de enumerar todas las partículas descubiertas hasta la fecha. Lo importante es que el papel principal de ladrillos de construcción del Universo lo desempeñan los electrones, los protones y los neutrones. ¿En qué se diferencian estas partículas unas de otras?

Hablando con propiedad, al afirmar que las partículas son diferentes sólo hacemos constancia de que éstas, de diferente manera, accionan sobre el mundo circundante y se comportan de

distinto modo bajo su influencia. Así, por ejemplo, todas las partículas poseen masa, con la particularidad de que su masa es distinta. La del protón es 1836 veces mayor que la del electrón, y la del neutrón supera algo la del protón, etc. En correspondencia, por una parte, estas partículas se comportan de distinto modo bajo la acción de las fuerzas externas ya que sus propiedades inertes son diferentes, y, por otra parte, en igualdad de las demás condiciones, las fuerzas de la interacción gravitacional de estas partículas entre ellas y con el mundo exterior son distintas.

Cuando decimos que los electrones y los protones son eléctricamente cargados, esto significa que éstos acusan capacidad para las interacciones de un tipo determinado (electromagnéticas), y nada más. La ausencia de carga en una partícula significa que ésta es incapaz de realizar semejantes interacciones. *La propia carga es la medida cuantitativa de la capacidad del cuerpo para las interacciones electromagnéticas*, a semejanza de como la masa gravitacional es una magnitud que determina la intensidad de las interacciones gravitacionales. La carga eléctrica es la segunda (después de la masa) importantísima característica de las partículas elementales que determina su comportamiento en el mundo circundante.

Todo lo expuesto no contiene nada insólito. En esencia, es que también los hombres —si no hablamos de su aspecto exterior— se diferencian unos de otros, principalmente, por su modo de influir en el mundo que les rodea y por la influencia que es capaz de ejercer sobre ellos el medio ambiente.

Así, por ejemplo, cuando decimos que mister Pickwick fue un hombre bondadoso, capaz, incluso, de sacar de la cárcel para deudores a la

viuda que procuró obligarlo a casarse con ella, en este caso sobreentendemos una norma determinada en su trato con las personas del círculo que le rodea. En cambio, si la conducta de la persona revela una norma antípoda, dicha persona ya será una encarnación de la maldad, como lo es mister Carker de la novela "Dombey e hijo", en el cual, según le parecía a missis Dombey, hasta cada diente era el instrumento del mal.

Por fin, el hombre puede mirar, sereno
"...a inocentes y culpables,
sin sentir ya ni compasión, ni ira,
inmutable ante lo bueno y lo malo".

Tal es, por ejemplo, Pimen en "*Borís Godunov*" de Alexandr Pushkin.

En la naturaleza existen partículas con cargas de signo opuesto. La carga del protón lleva el nombre de positiva, y la del electrón, de negativa. El signo positivo de la carga de una partícula no significa, por supuesto, que ésta es portadora de unos méritos especiales. La introducción de las cargas de dos signos expresa meramente el hecho de que las partículas cargadas tanto pueden atraerse, como repelerse unas de otras. Cuando las partículas llevan cargas homónimas experimentan repulsión, y cuando tienen cargas diferentes, se atraen.

Análogamente a como los hombres se distinguen no sólo por su bondad y peso, las partículas elementales, además de la carga y la masa, poseen también una serie de otras propiedades. Pero he aquí lo que es trascendental: por muy grandes que sean las diferencias en las propiedades de las partículas elementales en los demás aspectos, su carga, si ésta, en general, existe, es la misma para todas ellas: para los electrones y protones, para los positrones y antipro-

tones, para los mesones ligeros, pesados y superpesados. Tan sólo los signos pueden ser diferentes. En la naturaleza no existe carga menor que la del electrón. Por el contrario, la bondad, al igual que otras cualidades morales está distribuida entre las personas de una forma muy, pero muy desigual. Entre lo angélico y lo diabólico —estas encarnaciones extremas de la personalidad humana— se encuentra toda una inmensidad de los más diversos caracteres.

Como demuestra la experiencia, la carga eléctrica se conserva en la naturaleza. La suma de las cargas de todas las partículas (teniendo en cuenta el signo de las cargas) queda invariable. Si se engendra una nueva partícula cargada (que es un caso muy frecuente), entonces, simultáneamente, observamos, de modo obligatorio, el nacimiento de otra partícula cuya carga lleva el signo opuesto. Y las parejas de partículas con cargas de signo contrario sucumben también sólo simultáneamente.

La carga y las leyes de las interacciones electromagnéticas

La existencia de la carga eléctrica en las partículas presupone que sus interacciones de fuerza obedecen a unas *leyes estrictamente determinadas* de interacciones de fuerza. Unas leyes que admiten la formulación matemática exacta y determinan el movimiento de las propias partículas. Es completamente evidente que, en esencia, todavía no sabemos nada sobre la carga si desconocemos las leyes de estas interacciones. De hecho, el conocimiento de las leyes debe formar orgánicamente parte de nuestras ideas acerca de la carga. (¡Es que no nos diría nada la característica de una persona como buena, si no hubiéramos sabido qué son las obras buenas!)

Estas leyes no son, de ningún modo, simples, y es imposible exponerlas en dos palabras. Están escritos centenares de volúmenes dedicados a las interacciones electromagnéticas, y otros centenares todavía están por escribir. Desde luego, para comprender qué es la carga eléctrica no es necesario leer todos estos volúmenes, sin embargo, se requiere un conocimiento más o menos fundamental de la electrodinámica (así se denomina la ciencia sobre las interacciones electromagnéticas).

Si después de todo lo relatado el lector sintiera a fondo la causa por la cual no se puede contar qué es la carga eléctrica haciéndolo con la misma sencillez con que se puede exponer, por ejemplo, qué es una locomotora, entonces, podemos seguir tranquilamente con nuestro relato. En cambio, si el lector no lo ha comprendido todavía, ¿a ver si le ayudará otro razonamiento?

Seguramente, el lector se acuerda del encantador cuento de Lewis Carroll "Alicia en el país de las maravillas". Alicia tenía un amigo: el Gato de Cheshire. Cuando se hallaba en situaciones embarazosas este gato aparecía ante ella, con la particularidad de que hacía su aparición por partes, y no como una figura entera. Primero aparecía su sonrisa y sólo después se perfilaba todo lo demás. Y en cuanto a su desaparición, lo hacía en secuencia inversa, comenzando por el extremo del rabo y terminando con la sonrisa que permanecía presente cierto rato después de que todo lo demás ya se había disipado. "Con frecuencia —se asombraba Alicia— ocurrió que había visto un gato sin sonrisa, pero, ¡una sonrisa sin gato!"

De un modo completamente análogo muchas veces se puede encontrar una partícula sin carga, mas una carga sin partícula es como la sonrisa



sin gato, y, por esta razón, sólo puede aparecer en un cuento de hadas. De conformidad con las ideas modernas, la carga eléctrica no puede considerarse como cierto mecanismo suplementario que las partículas portan en sí. Como un mecanismo que se puede quitar de la partícula, descomponer en sus partes constituyentes y volver a montar. La existencia de la carga en la partícula está ligada indisolublemente con toda su estructura que, por ahora, todavía desconocemos, de la misma forma como, por ejemplo, la bondad está vinculada con toda la fisonomía síquica del hombre. Análogamente a como no hay un mecanismo separado responsable por las obras buenas, del mismo modo tampoco existe un mecanismo responsable por las "obras electromagnéticas" en la partícula.

*En esencia, llamamos carga no el mecanismo en la partícula, sino la capacidad de ésta, en su totalidad, de actuar recíprocamente con otras partículas de una forma determinada**.

---

* Cabe señalar, sin embargo, que la carga eléctrica actúa de la misma manera en todas las partículas. Otras propiedades de las partículas no ejercen influencia sobre su comportamiento electromagnético.

Ahora hablamos de las ideas vigentes en la ciencia en el día de hoy. No se debe pensar que nuestros conocimientos sobre la carga son exhaustivos y que, en adelante, la ciencia no será capaz de añadir a éstos nada más. Ya en la actualidad en la física de las partículas elementales se plantean las siguientes preguntas: ¿por qué están cargadas tan sólo algunas partículas elementales? ¿Por qué no se observa una carga mayor o menor que la del electrón? ¿Cómo la magnitud de la carga está relacionada con otras constantes universales, tales como la velocidad de la luz, la constante de Planck, etc.? Quién sabe, probablemente no esté lejos el momento en que se hallarán las respuestas, pues ya se han logrado ciertos éxitos en la investigación de lo más recóndito. En los experimentos de Hofstadter, durante el bombardeo de los protones con los electrones de energía muy grande, se consiguió establecer el carácter aproximado de distribución de la carga eléctrica en el seno de estas partículas. Resultó que la carga del protón estaba "esparcida" por un zona finita del espacio (de $0{,}8 \cdot 10^{-13}$ centímetros de radio, aproximadamente) y distribuida en esta zona de una forma que dista mucho de ser uniforme. En el centro se tiene una parte más densa, el llamado "núcleo" cuyas dimensiones son como 4 veces menores, que las del protón. Al mismo tiempo se puso de manifiesto que zonas cargadas existen también en el interior del neutrón.

Lo más sorprendente es que a pesar del carácter "esparcido" de la carga en el espacio, de ésta es imposible desgajar aunque sea un solo "granito". La imposibilidad de existencia de una carga menor que una cantidad determinada es, quizá, el hecho más incomprensible entre todo aquello que concierne a la naturaleza y la esencia de la carga eléctrica.

Cabe notar, además. que hasta ahora sólo nos hemos referido a las cargas de las partículas elementales. Como no es difícil figurarse, un cuerpo de tamaño grande (macroscópico) estará eléctricamente cargado si contiene un exceso de partículas elementales de signo homónimo. La carga negativa del cuerpo viene condicionada por el exceso de electrones en comparación con los protones, y la carga positiva, por su escasez. La mayoría de los cuerpos es eléctricamente neutra debido a que el número de electrones en éstos es igual al de protones. Y el mundo, ¿es éste neutro en su totalidad? Si el Universo es finito, entonces, su carga eléctrica es igual a cero. En el caso de un Universo infinito la carga total puede ser distinta de cero.

Tiene valor esencial el hecho de que la neutralidad eléctrica no significa, de ningún modo, que el cuerpo carece de propiedades electromagnéticas. Éstas siempre existen en forma latente. Ni siquiera el neutrón, partícula elemental neutra, está privada de estas propiedades.

Por sus propiedades electromagnéticas el neutrón se asemeja a un pequeño imán.

3. Interacción de las cargas eléctricas inmóviles

Primeros pasos

Nunca nos enteraremos de quién fue el primero en prestar atención a la admirable capacidad del ámbar frotado con lana de atraer hacia sí diferentes objetos ligeros, sin entrar en contacto con éstos. Este acontecimiento se remonta a los tiempos muy antiguos. De acuerdo con las palabras del filósofo helénico Tales de Mileto que vivió en el siglo VI a.n.e. estas personas fueron los tejedores.

Más tarde se descubrió que esta propiedad la poseen también el vidrio, la ebonita y otras sustancias frotadas con cuero o piel, y no solamente el ámbar. En griego el ámbar se denomina electrón, y debido a ello los cuerpos llevados a tal estado comenzaron a llamarse electrizados.

De este modo, el término "electricidad" tiene cierto grado poético.

En estos experimentos muy simples los hombres, por primera vez, se encontraron con una manifestación explícita de las fuerzas eléctricas. Sin embargo, transcurrieron más de dos milenios antes de que comenzara la investigación sistemática de la electricidad y se descubriera la ley de la interacción de los cuerpos electrizados. La insólita propiedad del ámbar y de algunos otros objetos parecía un extraño caso curioso: ¿cómo pueden atraerse los cuerpos sin entrar en contacto? No había indicio alguno testimoniando que aquí, en forma más simple, intervenían leyes que rigen el curso de la mayoría de los procesos en la Tierra.

De hecho, en el transcurso de muchos siglos no se hizo intento serio alguno de dar una explicación científica a los experimentos con los cuerpos electrizados. Es que no se puede considerar como explicación las tentativas de atribuir al ámbar la posesión de un alma viva. Con frecuencia, a estos experimentos, como a un entretenimiento, se dedicaban simplemente hombres acomodados que no tenían nada que ver con la ciencia. En las cortes de los soberanos europeos se organizaban "veladas eléctricas". Especialmente se interesaba por éstas Catalina II de Rusia. Se construyeron máquinas eléctricas. Se aprendió a obtener grandes chispas eléctricas.

Sea como fuere, precisamente desde estos sen-

cillos experimentos comenzó el desarrollo de la ciencia sobre la electricidad. Y no se trata meramente de que la atracción de los cuerpos electrizados pasmaba la imaginación, impulsando, de por sí, buscar la clave de este problema, mientras que, digamos, las fuerzas de elasticidad son tan ordinarias que son incapaces de despertar emoción alguna. Lo principal radica en que aquí, inmediatamente, nos encontramos con la manifestación directa de una de las leyes fundamentales de la interacción de los cuerpos cargados; y establecer esta ley resultó ser mucho más fácil que llegar a comprender la acción recíproca de los átomos que integran los cuerpos eléctricamente neutros.

Cuando al principio de este capítulo hicimos el intento de rastrear la cadena de preguntas y respuestas concernientes al origen de las fuerzas de elasticidad, deteniéndonos en el propio inicio, por supuesto, no fue obligatorio proceder de esta manera. Habríamos podido seguir adelante, contar sobre los átomos, sobre su estructura y las fuerzas de interacción entre éstos. Sencillamente, semejante método de exposición es poco conveniente. Sin embargo, es completamente improbable admitir que, al estudiar la naturaleza de las fuerzas de elasticidad, los hombres hubieran podido llegar al descubrimiento de las leyes fundamentales de las interacciones electromagnéticas. Con el mismo éxito se puede admitir que los hombres, primero, hubieran podido inventar el automóvil y luego, simplificándolo gradualmente, hubieran llegado a crear un carro y, por fin, la rueda. Aunque hoy en día, al explicar a un niño que vive en la ciudad qué es un carro, lo más simple sea, quizá, comenzar por el automóvil.

En la actualidad, a cada uno está claro que es mucho más fácil explicar el movimiento de

la piedra que el de un gato. Hasta tal punto son correctas las ideas que tiene sobre el mundo el hombre moderno incluso alejado de la ciencia. No obstante, hablando francamente, para mucha gente, incluso ahora, las manifestaciones de las fuerzas de elasticidad (por ejemplo, el rebote del balón de fútbol) parecen simples y comprensibles, en tanto que la atracción a distancia de los pedacitos de papel al peine o de dos imanes uno al otro se representa como un enigma. Pero en la realidad todo resulta ser al revés. Precisamente estas fuerzas "enigmáticas" son más simples, mientras que las acostumbradas fuerzas de elasticidad se pueden comprender, en efecto, al reducirlas a la manifes-



tación de las fuerzas "insólitas". Esto lo haremos, precisamente, más tarde.

Hasta la mitad del siglo XVIII los éxitos en el estudio de la electricidad no fueron grandes. Se descubrió la electricidad de dos tipos: la positiva y la negativa, así como la posibilidad de transmitir y acumularla; también se dio una interpretación correcta al relámpago como una gigantesca chispa eléctrica entre dos nubes o entre una nube y la Tierra. Y por fin, se llegó a la primera aplicación práctica de los conocimientos adquiridos: Franklin inventó el pararrayos.

Resultó que una afilada barra metálica levantada sobre los edificios y conectada a tierra protege estos edificios contra el impacto del rayo. El descubrimiento en cuestión produjo una impresión enorme. El pararrayos, literalmente, se puso de moda. Las señoras lo llevaban en sus sombreros a guisa de adorno*. Es curioso que el rey de Gran Bretaña Jorge III insistiera en que las puntas de los pararrayos en su palacio fuesen redondas y no afiladas como lo había propuesto el republicano Franklin a quien pertenecía un papel relevante en la lucha de las colonias norteamericanas contra la Inglaterra por su independencia. El presidente de la *Royal Society* que se opuso a la arbitrariedad del monarca se vio obligado a presentar su dimisión.

Solamente después de los enormes éxitos de la mecánica de Newton resultó posible descubrir la exacta ley de la interacción de los cuerpos inmóviles electrizados, o, como suele decirse aho-

---

* Tampoco hoy se ha extinguido el interés por parte de la moda femenina hacia los más modernos alcances de la ciencia y la técnica. El lanzamiento del primer spútnik, o sea, satélite artificial de la Tierra soviético ejerció influencia, en su tiempo, en la forma de los sombreros y en los peinados.

ra, de los cuerpos eléctricamente cargados. Primeramente, esta ley fue descubierta no para las distintas partículas elementales sobre cuya existencia, en aquel entonces, no se tenía ni siquiera una noción, sino para cuerpos cargados grandes. Como se conoce bien actualmente, durante la electrización por frotamiento las partículas cargadas más ágiles, o sea, los electrones, pasan de un cuerpo al otro. Debido a esta transición, el cuerpo que perdió los electrones se carga positivamente, y el que los recibió en exceso resulta cargado negativamente.

Las tareas de la ciencia

La creación de la mecánica por Newton, el descubrimiento de las fuerzas de la gravitación universal y la explicación con su ayuda del movimiento de los planetas ejercieron una influencia tan fuerte en los hombres de ciencia que éstos, también en otros campos de la física, se afanaban por buscar leyes al estilo de las Newton. Con ello, fue prefijado un camino certero al pensamiento científico. En lugar de intentos infructuosos de inventar cierto mecanismo intangible que asegurase las fuerzas actuantes a distancia entre los cuerpos cargados, se procedió a buscar, por vía experimental, la forma cuantitativa para el tipo dado de interacciones. Es difícil sobreestimar el valor de este viraje cardinal en el modo de abordar el estudio de la naturaleza. Ésta fue, sin duda alguna, una de las más grandes revoluciones en las ciencias naturales que se inició, como ya hemos señalado en el capítulo sobre las fuerzas gravitacionales, con anterioridad a Newton y estaba lejos de concluirse con su muerte. El quid de esta revolución reside en que se dejó de ver la misión de la ciencia en las tentativas de reducir los

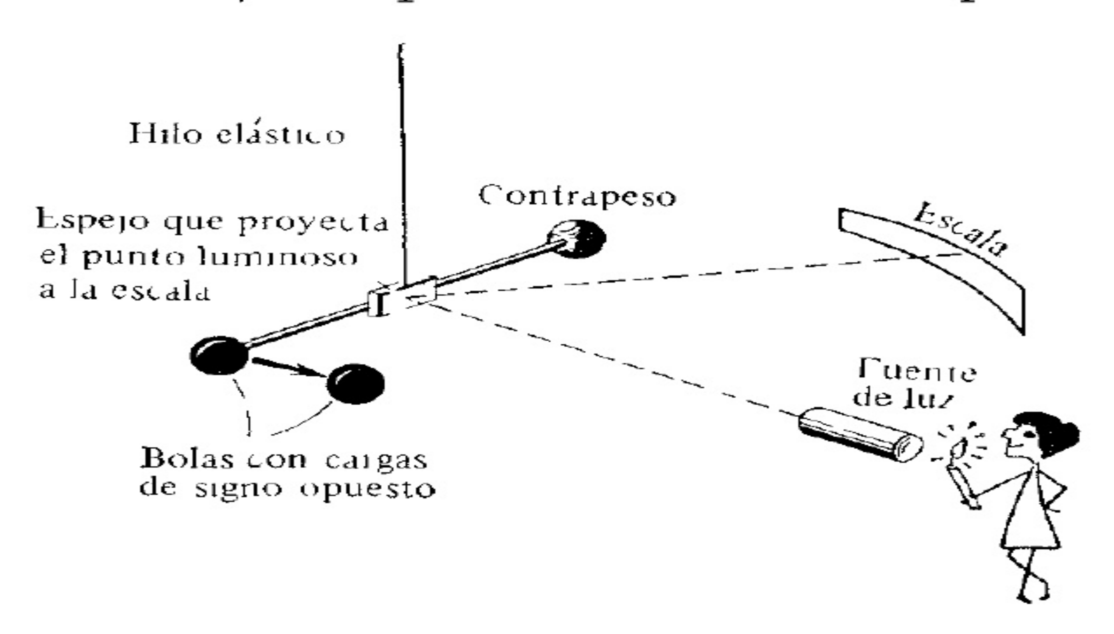
fenómenos insólitos e "incomprensibles" a los acostumbrados y "comprensibles" desde el punto de vista del sentido común. Como objetivo de la ciencia devino la búsqueda de las leyes generales de la naturaleza que tuvieran expresión matemática y abarcaran un conjunto ingente de hechos. Se comenzó a requerir que a base de estas leyes se explicasen las cosas a las que estábamos acostumbrados y las cuales, al parecer, no exigían explicación. Con ello se lanzó un reto directo al "sentido común". Un reto que en las teorías tales como la de la relatividad y la mecánica cuántica llevó a la contradicción directa respecto a semejante "sentido común". Lamentablemente, no todas las personas llegaron a asimilar, en cuerpo y alma, la médula de esta orientación de la ciencia. Por eso, incluso ahora, con frecuencia, surge gran cantidad de preguntas perplejas. No es fácil llegar a sentir a fondo este problema. La revolución que debe efectuarse en este caso en la conciencia del hombre se puede comparar con el trastorno operado en la cabeza de un salvaje que debe pasar de los medios de curación tan claros como, es por ejemplo, exorcizar los espíritus malignos, etc. a unas medidas misteriosas: observar las normas higiénicas, hervir el agua, vacunarse, tomar antibióticos, etc. Como se pone de manifiesto, no son los seres semejantes al hombre y habituales para el "sentido común": los que se deben ahuyentar, sino los microbios y virus los cuales no siempre se pueden advertir incluso con el microscopio.

Ley de Coulomb

El descubrimiento de la interacción de las cargas eléctricas inmóviles unas respecto a otras fue hecho bajo la influencia directa de las

ideas de Newton, en particular, de su ley de la gravitación universal. Se puede decir que este descubrimiento se realizó sin dificultades especiales. A mediados del siglo XVIII ya se anunciaban las conjeturas de que la ley de la interacción de las cargas es análoga a la de la gravitación universal. El primero en demostrarlo experimentalmente fue el inglés Cavendish. Sin embargo, este relevante hombre de ciencia se distinguía también por su relevante extravagancia. Su devoción a la ciencia rayaba en fanatismo. Así, por ejemplo, para ahorrar el tiempo se explicaba con sus familiares por medio de signos establecidos de una vez y para siempre. Cavendish no publicó sus trabajos dedicados a la electricidad. Sus manuscritos permanecieron "enterrados" durante más de cien años en la biblioteca de la Universidad de Cambridge, hasta que Maxwell los "extrajera" y publicara. Pero para esta fecha, en Francia, Coulomb ya estableció la ley de la interacción de las cargas, y desde aquel entonces dicha ley lleva su nombre.

Coulomb llegó a su objetivo por un camino más sencillo, aunque menos estricto que Caven-



dish. Nos detengamos en los experimentos de Coulomb.

Al descubrimiento de la ley por Coulomb contribuyó el hecho de que las fuerzas de interacción entre las cargas son grandes. Debido a esta circunstancia aquí no era necesario aplicar aparatos muy sensibles, como sucedió en el caso de la comprobación de la ley de la gravitación universal en las condiciones terrestres. Un dispositivo sencillo que recibió el nombre de balanza de torsión de Coulomb dio la posibilidad de contestar a la pregunta de cómo actúan entre sí los cuerpos cargados inmóviles. La balanza de torsión no es sino una varilla suspendida de un fino y elástico alambre, en uno de cuyos extremos viene fijada una bolita metálica cargada y en el otro el contrapeso. Otra bolita más se encuentra fijada en una posición inmóvil cerca de la balanza. La fuerza de interacción se medía basándose en la torsión del alambre, investigando su dependencia respecto a la distancia y las magnitudes de las cargas. En cuanto a la fuerza y la distancia, éstas se sabían medir. La única dificultad consistía en la carga. Coulomb precedió de un modo sencillo e ingenioso. Cambiaba la magnitud de la carga de una de las bolitas 2, 4, etc. veces conectándola con una bolita idéntica, pero no cargada. En este caso la carga se distribuía entre las dos bolitas en igual medida lo que, precisamente, disminuía el valor de la carga investigada en razón conocida. Simultáneamente, se observaba cómo varía la fuerza.

Los experimentos de Coulomb llevaron al descubrimiento de una ley la cual, asombrosamente, se asemejaba a la de la gravitación. *La fuerza de interacción de los cuerpos cargados inmóviles es directamente proporcional al producto de sus cargas e inversamente proporcional al cuadrado de la dis-*

tancia entre ellos. Cabe señalar, en el acto, gue, al igual que la ley de Newton, la de Coulomb es válida tan sólo para las cargas "puntuales", es decir, para aquellas cuyas dimensiones geométricas son pequeñas en comparación con la distancia que las separa. Ahora bien, en general, la fuerza depende de las dimensiones geométricas y la forma de los cuerpos cargados. Esta fuerza se suele denominar culombiana.

El descubrimiento de la ley de Coulomb permitió, por primera vez, considerar la carga como una cantidad determinada, o sea, medirla.

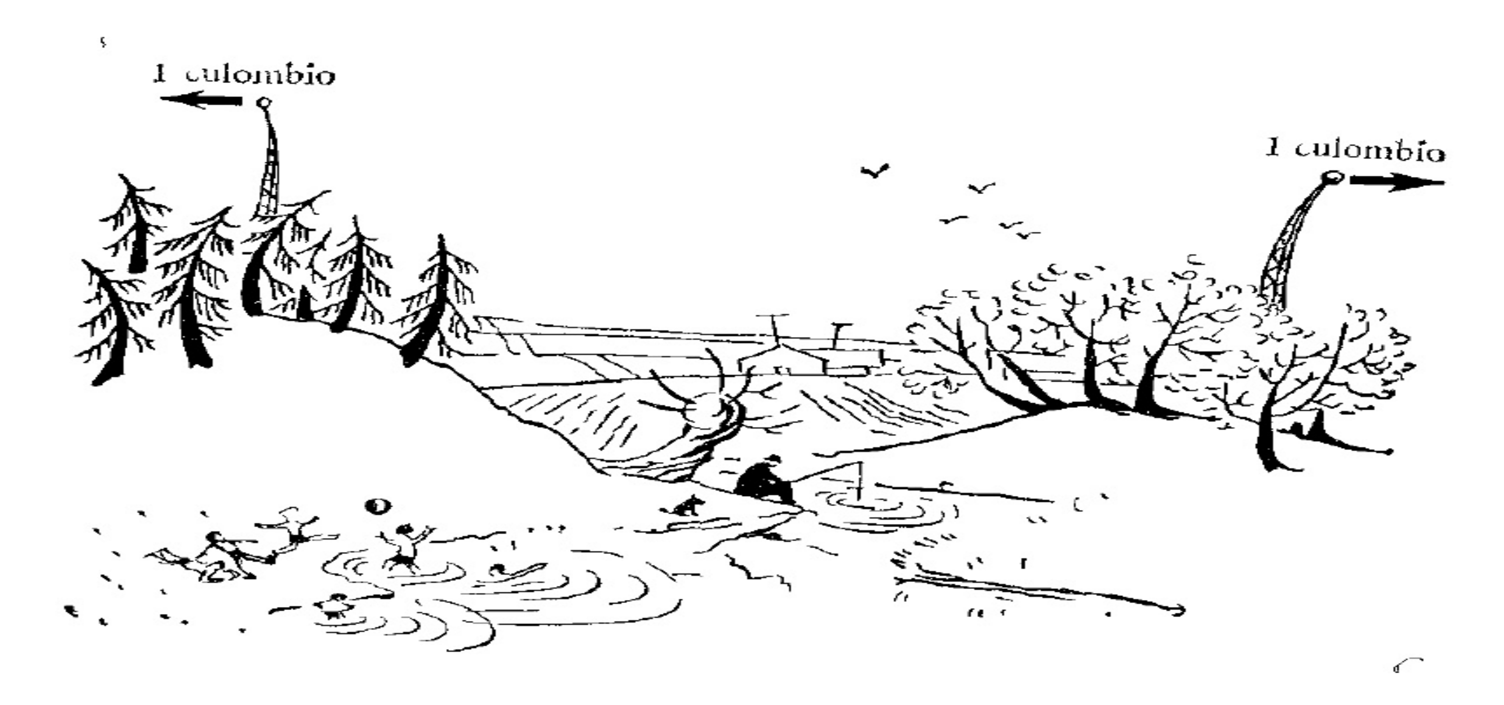
Para alcanzar este objetivo es necesario disponer de unidad de medición. La ley de Coulomb depara, precisamente, esta posibilidad. Es que resulta prácticamente imposible crear un patrón de la carga, a semejanza, por ejemplo, del metro que es el patrón de la longitud, debido a la fuga, siempre presente, de la carga. Sería natural tomar como unidad de carga la del electrón (precisamente esto se ha hecho ahora en la física atómica) pero en aquella época aún no se sabía nada acerca de la estructura discreta de la electricidad. Se tomó como unidad de carga una carga tal que, en el vacío y a una distancia de 1 cm, *actúa sobre otra carga igual con la* fuerza de una unidad, dina*. En este sistema de unidades la carga del electrón es igual a $4{,}8 \cdot 10^{-10}$. Es un valor muy, pero muy pequeño.

Las fuerzas culombianas disminuyen lentamente con la distancia y pertenecen a las que actúan a distancia, al igual que las newtonianas.

Sin embargo, a la par de la semejanza de estas leyes entre éstas se tienen también serias diferencias. En primer lugar, es la existencia de cargas de dos signos, mientras que la masa gra-

* En el Sistema Internacional de Unidades (SI) se utiliza la unidad de carga llamada culombio que es $3 \cdot 10^{9}$ veces mayor que la dada.

vitacional siempre es positiva. Junto a la atracción de las cargas eléctricas existe también la repulsión.



Otra cosa consiste en que las fuerzas culombianas no actúan entre los cuerpos neutros y, por lo tanto, no son tan universales como las de gravitación universal. Su universalidad sólo se manifiesta en que una misma ley es válida tanto para la interacción de los cuerpos macroscópicos, como para las distintas partículas elementales. Este hecho se puso en claro inmediatamente después de haber sido descubiertas estas partículas. Desde el punto de vista moderno, la validez de la ley de Coulomb para las cargas macroscópicas estriba, precisamente, en que ésta, de un modo directo, se cumple para las partículas elementales.

Otra particularidad importantísima de las fuerzas culombianas es su magnitud. Como ya hemos mencionado antes, las fuerzas eléctricas entre las partículas elementales aisladas superan inconmensurablemente las gravitacionales. Si se hu-

biera logrado transmitir de una persona a otra 1% de electrones, entonces, a la distancia de un brazo extendido, la fuerza de atracción entre éstas sobrepasaría el peso del globo terráqueo. Sin embargo, la interacción entre las partículas elementales es tan grande que es imposible crear en un cuerpo pequeño una carga muy considerable. Al repelerse mutuamente con gran fuerza, las partículas no estarán en condiciones de retenerse en el cuerpo. Entre tanto, en la naturaleza no existen otras fuerzas cualesquiera capaces de compensar, en las condiciones dadas, la repulsión culombiana. Ésta es de las causas por la cual no hallamos en la naturaleza una atracción o una repulsión notorias de los grandes cuerpos cargados. Además, los cuerpos cargados manifiestan una propensión muy ostensible a la neutralización. Con gran avidez absorben las cargas de signo opuesto atrayéndolas a su seno.

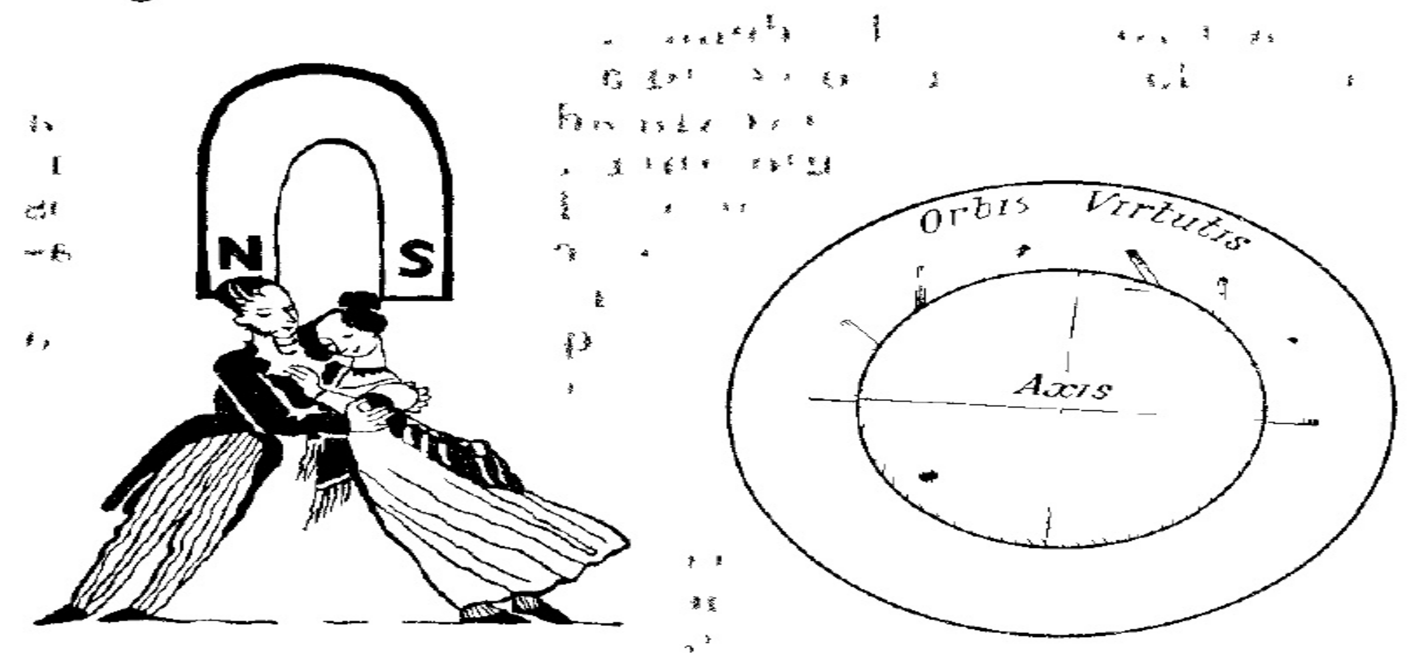
La mayoría de los cuerpos en la naturaleza son neutros. Por lo demás, como suponen los físicos, la Tierra posee una carga negativa de $6 \cdot 10^9$ culombios, aproximadamente. En forma pura, las fuerzas culombianas actúan, principalmente, en el interior de los átomos neutros y en los núcleos atómicos cargados. Pero hablaremos sobre el particular más tarde.

Recalquemos una vez más que el conocimiento con la ley de Coulomb es el primer paso concreto encaminado a estudiar las propiedades de la carga eléctrica y, con ello, a esclarecer el sentido del propio concepto de la carga eléctrica. La presencia de la carga eléctrica en las partículas elementales o en los cuerpos significa que los mismos actúan entre sí de acuerdo con la ley de Coulomb.

4. Interacción de las cargas eléctricas en movimiento

Interacción de los imanes

Es difícil encontrar a una persona que en la infancia no se hubiese quedado asombrada por las sorprendentes propiedades del imán. A una distancia considerable, directamente a través del vacío (desde luego, ¡claro que no es aire el que le ayuda!) el imán es capaz de atraer trozos pesados de hierro. No menos admirable es el comportamiento de la aguja magnética de la brújula la cual con tenacidad pugna por tomar la dirección al norte, despreciando cualesquiera giros que Ud. dé a la brújula en su afán de desorientarla. Tal vez, sólo las capacidades inusitadas del trompo puedan rivalizar con el imán en cuanto a la impresión que éste deja en la imaginación.



La atracción de los imanes hace recordar la atracción a distancia de los cuerpos electrizados. No en vano éstos se confundían en el curso de

muchos siglos. Solamente Gilbert, a finales del siglo XVI logró demostrar que no es una misma cosa. En efecto, el imán, para ejercer la atracción, no necesita que se recurra a tales operaciones preliminares como el frotamiento. Y esta capacidad suya no desaparece con el tiempo, como suele ocurrir con los cuerpos electrizados, a menos que se le someta a un calentamiento muy fuerte o se le sacuda.

Los imanes, a semejanza de las cargas, pueden tanto atraerse, como repelerse. ¡Pero he aquí lo extraño! Nadie logró separar el magnetismo norte del magnetismo sur, obteniendo un polo magnético aislado, a pesar de invertir en esta faena muchísimos esfuerzos.

La atracción de los imanes, de ordinario, supera considerablemente la de los cuerpos electrizados. Por lo visto, precisamente debido a esta razón a los primeros se les atribuían capacidades en verdad milagrosas, mientras que cuando se trataba de las de la atracción eléctrica, más débil, no se decidía a hacerlo. Así, por ejemplo, se suponía que el imán era capaz de curar las enfermedades*, reconciliar a los esposos, etc.

Al igual que en el caso de la atracción eléctrica, durante un largo período no se llevó a cabo la investigación científica de las propiedades de la interacción magnética. Qué "valor" tenía, por ejemplo, la asombrosa opinión de que la acción del imán cesaba si éste se frotaba con ajo. Solamente comenzando por Gilbert la investigación de los imanes fue puesta sobre una estricta base científica. Precisamente Gilbert se percató de que el globo terráqueo es un enorme

---

* Actualmente, con un nuevo interés, se discute el problema sobre la influencia que el campo magnético ejerce en los organismos vegetales y animales.

imán y por esta causa la aguja magnética se orienta de un modo determinado. El científico supo confirmar su conjetura experimentalmente, imantando una gran bola de hierro (llamó esta bola "terella", o sea, Tierra pequeña) y observando su acción sobre la aguja. En uno de los dibujos del libro "De magnete" Gilbert representó la posición de los imanes pequeños con respecto a la "terella".

La interacción cuantitativa de los imanes la estudió Coulomb valiéndose del mismo método que en el estudio de la interacción de las cargas. Coulomb halló la ley de la interacción de los polos de los imanes largos considerándolos como puntos de concentración de las cargas magnéticas, objetos análogos a las cargas eléctricas. Esta ley resultó ser idéntica a la de la interacción de las cargas eléctricas. Coulomb explicó la imposibilidad de separar los polos norte y sur del imán por la incapacidad de las cargas magnéticas de signo opuesto dentro de las moléculas de la sustancia para trasladarse libremente de una molécula a otra.

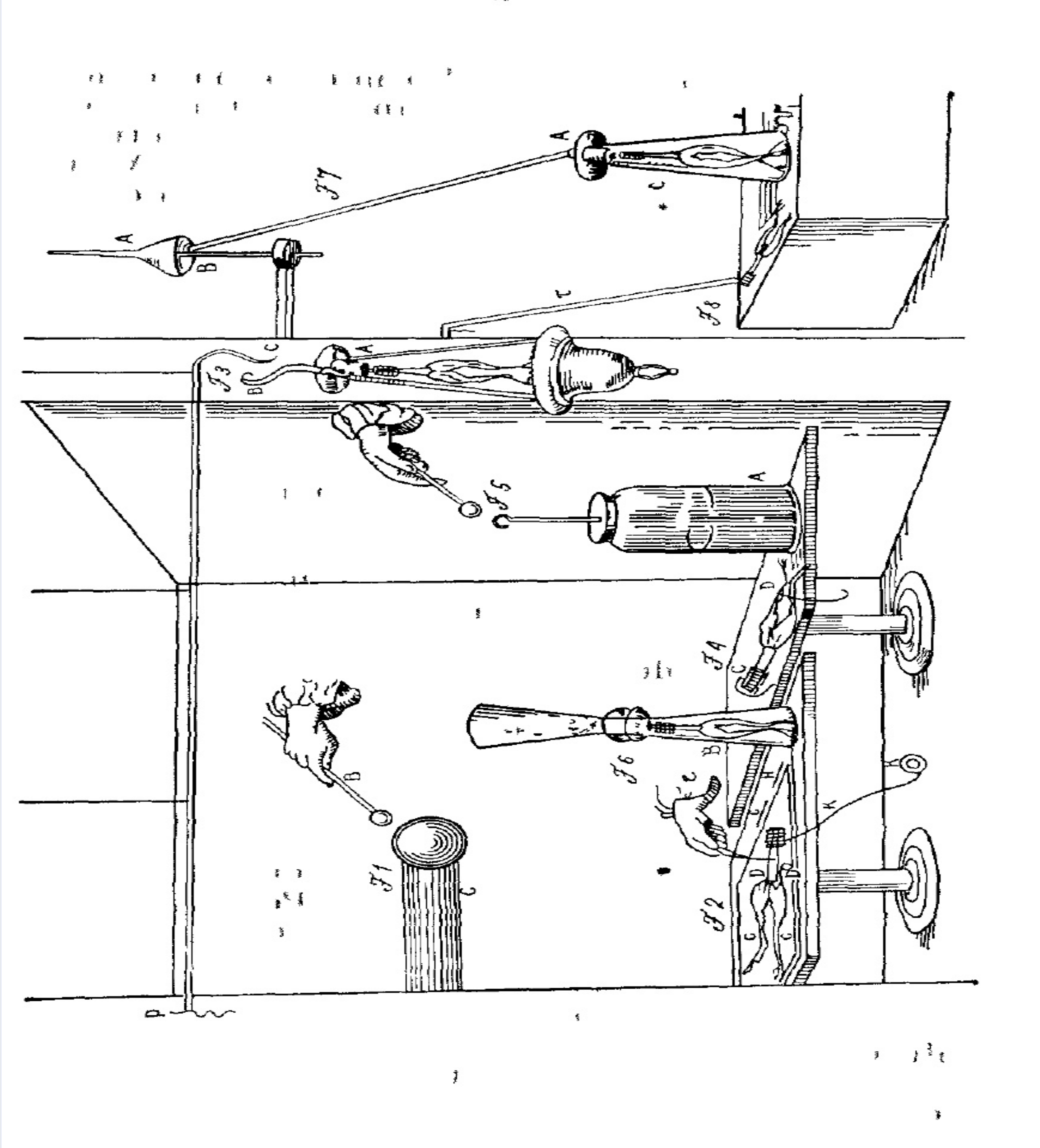
Se podía pensar (y ésta era, precisamente, la opinión de Coulomb) que aquí se trataba de la misma ley fundamental que en el caso de interacción de las cargas eléctricas inmóviles. Al introducir una nueva magnitud —la carga magnética— Coulomb consideró que el descubrimiento de la ley de la interacción de las cargas magnéticas agota el problema del magnetismo. Y no hubo ningún motivo evidente para poner en tela de juicio esta opinión. Coulomb procedía ateniéndose a un "patrón" hecho, o sea, la ley de Newton para la interacción de las masas gravitacionales. ¿Por qué, entonces —es lícito preguntar— este "patrón", en un caso, estaba en condiciones de llevar al descubrimiento de una nueva ley fundamental, y en el otro, no?

La corriente eléctrica y la "electricidad animal"

En la realidad todo resultó mucho más complicado. Aquí, la naturaleza supo deparar a los investigadores una de sus sorpresas de turno, sorpresas para las cuales es tan generosa. A la fantasía humana cuesta mucho trabajo alcanzarla. La solución del enigma del magnetismo llegó por el lado completamente distinto. Esto ocurrió después de que se aprendiera a crear corriente eléctrica —flujo de cargas eléctricas en movimiento— de considerable intensidad y de duración bastante prolongada. La historia de este descubrimiento no carece de interés y está ligada con las búsquedas de la llamada "electricidad animal".

El comienzo de esta historia lo puso la descarga de la botella de Leiden, este primer condensador. P. Musschenbroek que descubrió este fenómeno, fue el primero quien experimentó en su propia persona la acción de la descarga eléctrica. "La mano y todo el cuerpo se afectan de un modo tan terrible que hasta me faltan palabras para describirlo —dice Musschenbroek—. En una palabra, pensé que llegó mi fin". Incluso aconseja a sus amigos que "ellos mismos nunca repitan esta nueva y espantosa experiencia".

En la realidad, este experimento no es tan espantoso: la corriente eléctrica de corta duración que se engendra durante la descarga de la botella no representa peligro para la vida. Pero sea como fuere, la acción fisiológica de la descarga eléctrica, en el acto, acaparó la general atención. A la par de muchas observaciones valiosas surgió un sinnúmero de teorías primitivas que explicaban con la acción de la electricidad la vida, las enfermedades, la muerte, etc. Descubrimientos interesantes y certeros se alternaban con las



más curiosas aberraciones. Así, por ejemplo, se explicó de una manera justa, como un fenómeno *análogo a la descarga de la botella de Leiden*, la acción fulminante del pez torpedo y de otros peces eléctricos. Sin embargo, simultáneamente con esta electricidad "animal" que existe en efecto, se descubrían hombres, pájaros y animales domésticos "eléctricos". En este caso a los experimentadores les inducía en error la electricidad engendrada durante el frotamiento de la vestimenta de los hombres, así como de las plumas o del pelo de los animales.

En estas circunstancias, dieron la posibilidad de hacer un descubrimiento fundamental los excelentes experimentos escrupulosamente pensados del experimentador Galvani. Por cierto, el propio Galvani no logró interpretar correctamente sus propios experimentos, pero Volta que los repitió se mostró capaz de realizar el gran descubrimiento el cual, de una vez, dio un potente impulso a todo el desarrollo de la ciencia sobre el electromagnetismo.

El primer descubrimiento tuvo lugar debido a una casualidad. "Corté y disequé una rana como se muestra en la fig. 2 de la tabla I —escribe Galvani— y, teniendo en cuenta completamente otros propósitos, la coloqué sobre la mesa en que se encontraba una máquina eléctrica, fig. 1, estando la rana por completo separada del conductor de la máquina y a una distancia bastante grande de ésta. Cuando uno de mis auxiliares, por casualidad, tocó con el filo del escalpelo, muy ligeramente, los nervios femorales interiores de esta rana, entonces, de inmediato, todos los músculos de las extremidades comenzaron a contraerse de tal manera que parecían afectados por intensísimas convulsiones tónicas. (Con la particularidad de que esto tenía lugar en el momento en que del conductor

de la máquina se extraía una chispa. *Nota de los autores.*) Entonces me sentí embargado —continúa Galvani— por un inverosímil celo y un afán vehemente de investigar este fenómeno y poner en claro aquello que encerraba en sí".

Pronto Galvani advirtió que la contracción de la patita de la rana conectada a un pararrayos sucedía durante los golpes de los rayos y hasta al aparecer nubes ceráuneas.

En esencia, en estos experimentos por primera vez se observó el fenómeno de la inducción electromagnética que más tarde descubriera Faraday. Pero en aquella época era imposible dar una explicación correcta de lo ocurrido. El descubrimiento que proporcionó un potente impulso al progreso del electromagnetismo consistía en otra cosa.

Galvani trató de detectar la acción de la electricidad atmosférica cuando hacía buen tiempo. Con este fin colgó la rana disecada de una verja de hierro, con la particularidad de que el gancho de cobre pasaba a través de la médula espinal del batracio. Al apretar el gancho contra la verja Galvani advirtió una fuerte contracción de los músculos. Afortunadamente, llegó a comprender que aquí el asunto no reside en la acción de la electricidad atmosférica. La contracción se observó siempre cuando la patita de la rana se tocaba con dos metales de distinta clase que estaban en contacto.

Por cuanto Galvani estaba enterado de que la contracción de los músculos aparecía durante la descarga eléctrica, el científico decidió que había descubierto la electricidad animal engendrada en el organismo. El conductor metálico, pensó Galvani, permite a la electricidad pasar rápidamente de unas partes del músculo a otras, lo cual provoca, precisamente, la contracción.

Una explicación correcta del fenómeno descu-

bierto por Galvani la dio compatriota de éste Volta. Y esta explicación le condujo a la creación de la primera fuente de corriente continua. En lo fundamental, precisamente aquí residía todo el valor que tenía para la física el descubrimiento de Galvani. A Volta le ocurrió una brillante conjetura. Las patitas de la rana no son sino un sensible "electrómetro animal", más sensible que otro cualquiera, y nada más. Ahora bien, de manantial de corriente eléctrica sirve el contacto de dos metales heterogéneos llevados al contacto con el líquido electroconductor de los tejidos animales. De aquí Volta sacó la idea de la primera pila galvánica: un juego de circulitos de cobre y de cinc con paño impregnado de agua salada interpuesto entre ellos. Según las palabras de Arago, "es el más admirable instrumento entre los inventados en todos los tiempos por los hombres, sin hacer excepción para el telescopio y la máquina de vapor".

Es interesante que ni Volta ni sus contemporáneos no tenían noción alguna acerca de cómo *y por qué trabaja dicho instrumento*. Por lo demás, en aquella época esta cuestión no revestía especial importancia para el desarrollo de la ciencia. Lo primordial era el hecho de que la pila voltaica permitía obtener la corriente eléctrica continua, es decir, poseía la capacidad de poner en movimiento las cargas eléctricas en el seno del conductor. Pasó mucho tiempo antes de que se explicara su acción. Tampoco nosotros nos detengamos en esta materia.

El descubrimiento de Oersted

La pila voltaica resultó ser, verdaderamente, un "cuerno de la abundancia". Nuevos descubrimientos se seguían sin interrupción. Humphry Davy descompuso los álcalis por medio de la

corriente y obtuvo sodio y potasio metálicos, Petrov descubrió el arco eléctrico, etc. Y, finalmente, Oersted, en 1820, hizo el más importante descubrimiento. Al colocar la aguja magnética cerca de un conductor con corriente Oersted observó que ésta gira.

Hay que tener presente que éste no fue un descubrimiento casual. Ya en 1807 Oersted se planteó el objetivo de estudiar si la electricidad ejerce alguna influencia sobre el imán. "La persistencia con que él... se encaminaba hacia su objetivo quedó remunerada por el descubrimiento de un hecho cuya existencia nadie, excepto él, podía suponer ni siquiera lejanamente, pero el cual, al hacerse conocido, no tardó en atraer la atención de todos capaces de apreciar su importancia y valor" (M. Faraday).

En los experimentos de Galvani se encontró una ligazón directa entre la maravillosa capacidad, descubierta casualmente por los pastores de los tiempos antiguos, de los pedazos de hierro de atraerse a distancia y la contracción de la patita de la rana. El magnetismo y la electricidad revelaron un profundo parentesco, lo que quedó demostrado por un experimento directo, con la particularidad de que la aguja magnética guardaba plena indiferencia respecto a las cargas en reposo. Tan sólo las cargas móviles estaban en condiciones de despertar en ésta "emociones familiares". El magnetismo está relacionado no con la electricidad estática, sino con la corriente eléctrica.

La interacción magnética es interacción de las corrientes eléctricas

El descubrimiento de Oersted casi de inmediato permitió resolver el enigma del magnetismo y, simultáneamente, hallar un tipo más — a la

par de culombiano— un tipo fundamental de interacción de las cargas eléctricas. Todo ello realizó una sola persona, el físico francés Ampère, haciéndolo literalmente durante meses contados, inmediatamente después de conocer el experimento de Oersted. Es interesante seguir el curso del pensamiento de este genial hombre de ciencia, el cual quedó grabado en sus informes que seguían uno tras otro en la Academia de Ciencias Francesa. Al principio, bajo la impresión directa obtenida observando la aguja magnética que giraba en las cercanías de la corriente, Ampère supuso que el magnetismo de la Tierra es engendrado por las corrientes que contornean el planeta en la dirección del Oeste al Este. El principal paso fue hecho. Las propiedades magnéticas del cuerpo se podían explicar por la corriente que circula en su interior. Seguidamente, Ampère llegó a la conclusión general: *las propiedades magnéticas de cualquier cuerpo vienen determinadas por las corrientes eléctricas cerradas dentro de éste.* Este paso decisivo desde la *posibilidad* de explicar las propiedades magnéticas por medio de las corrientes hacia la *afirmación* categórica de que la interacción magnética es la interacción de las corrientes es el testimonio de la gran audacia científica de Ampère.

De conformidad con la hipótesis de Ampère, en el seno de las moléculas que componen la sustancia circulan corrientes eléctricas elementales. Si estas corrientes están situadas caóticamente unas respecto a otras, su acción se compensa en forma recíproca, y el cuerpo no acusa ningunas propiedades magnéticas. En el estado magnetizado las corrientes elementales en el cuerpo están orientadas de una manera estrictamente determinada de modo que sus acciones se suman.

Allí donde Coulomb vio polos magnéticos indivisibles resultaron encontrarse meras corrien-

tes eléctricas cerradas. La indivisibilidad de los polos magnéticos perdió su carácter enigmático. No hay cargas magnéticas y no hay nada que dividir. *La interacción magnética está condicionada no por las cargas magnéticas especiales semejantes a las eléctricas, sino por el movimiento de las cargas eléctricas, o sea, por la corriente.*

Es interesante que el carácter fructífero de la idea sobre la unidad de las fuerzas de la naturaleza no se manifestó, quizá, con tanta claridad en ningún otro ámbito como durante la formulación de las leyes principales del electromagnetismo. Inspirado por esta idea Oersted acercó la aguja magnética al conductor con corriente, y Ampère, con su imaginación supo divisar corrientes eléctricas en el interior de un pedazo magnético de hierro. Esta misma idea, más tarde, llevó a Faraday a un nuevo y magistral descubrimiento, al descubrimiento de la inducción electromagnética.

La ley de Ampère

Ampère no sólo atinó que al estudiar la interacción magnética es necesario, en primer lugar, investigar la acción recíproca de las corrientes eléctricas, sino que él mismo, inmediatamente, se dedicó al estudio experimental de esta interacción. En particular, él estableció que las corrientes de una misma dirección se atraen y las dirigidas en sentidos opuestos se repelen. Los conductores mutuamente perpendiculares no influyen unos sobre otros.

En fin de cuentas, los esfuerzos tenaces se coronaron con pleno éxito. Ampère descubrió la interacción mecánica entre las corrientes eléctricas, resolviendo, por lo tanto, el problema de la interacción magnética. Aquella ley de la interacción de los polos de los imanes la cual

Coulomb consideró como fundamental resultó uno de los innumerables corolarios del descubrimiento de Ampère. Maxwell escribió así sobre Ampère: "Todo en conjunto, tanto la teoría, como el experimento, parecía como si emergieran en plena madurez y totalmente armados de la cabeza del "Newton de la electricidad". Estas investigaciones están consumadas por su forma, son ideales por su precisión y se presentan resumidas en una fórmula a partir de la cual pueden deducirse todos los fenómenos y la que por siempre debe quedar como fórmula fundamental de la electrodinámica".

No expondremos detalladamente los experimentos que condujeron a Ampère al descubrimiento de la interacción de las corrientes, como lo hemos hecho para el caso incomparablemente más sencillo de interacción de las cargas inmóviles. Además, ni siquiera tenemos necesidad de formular la ley de Ampère para las corrientes como lo hiciera él mismo. No olviden que la corriente eléctrica no es sino el flujo de cargas eléctricas en movimiento. Por consiguiente, la interacción de las corrientes no es otra cosa que la interacción de las cargas que se mueven. De este modo, a la par de la interacción de Coulomb que se determina solamente por magnitud de las cargas y la distancia entre éstas, durante el movimiento de las cargas surge un nuevo tipo de interacción. Ésta viene determinada no sólo por las cargas y la distancia, sino también por las velocidades del movimiento de las cargas. *¡Por primera vez en la física fueron descubiertas fuerzas fundamentales dependientes de las velocidades!*

La fuerza de interacción de las cargas en movimiento es proporcional al producto de estas cargas, inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre ellas, al igual que en la ley

*de Coulomb, pero, además, depende también de las velocidades de estas cargas y de la dirección de su movimiento**. En el descubrimiento de esta ley radica *todo el sentido de los esfuerzos* anteriores.

Las fuerzas magnéticas se diferencian sustancialmente de las eléctricas también en otro aspecto. No acusan carácter central como es propio de las fuerzas culombianas y gravitacionales. Esta circunstancia se puso de relieve ya en los experimentos de Oersted: la aguja magnética no se atraía al alambre ni se repelía de éste, sino giraba. La fuerza descubierta por Ampère actúa sobre las partículas en movimiento en la *dirección perpendicular a su velocidad*.

En las condiciones ordinarias, las fuerzas de interacción magnética de las partículas son mucho más débiles que las culombianas. Solamente para las velocidades de las partículas que se aproximan a la de la luz dichas fuerzas llegan a ser comparables. Pero sea como fuere, las fuerzas de interacción de las corrientes pueden alcanzar valores muy grandes. Basta recordar que son precisamente estas fuerzas las que ponen en rotación el inducido de cualquier motor eléctrico, incluso el más grande. Y las fuerzas culombianas, mucho más potentes, casi de ningún modo revelan su presencia en la técnica. El quid de la cuestión consiste en que nosotros podemos crear corrientes muy grandes, es decir, poner en movimiento (aunque, por cierto, relativamente lento) un cantidad enorme de electrones en los conductores. En cambio, no se consigue engendrar cargas electrostáticas muy grandes. Por muy extraño que esto parezca, las interacciones magnéticas, en esencia, tan sólo en la técnica desempeñan el papel

* Claro está, se debe tener en cuenta que estas fuerzas actúan a la par con las culombianas las cuales no desaparecen, de ningún modo, durante el movimiento.

primordial (recordemos los motores eléctricos). En cuanto a la naturaleza, su papel, en comparación con las culombianas, es —como lo veremos más tarde— bastante modesto, pues se trata de las fuerzas de interacción de las corrientes las cuales, en la naturaleza, raras veces alcanzan gran valor.

El descubrimiento de Ampère amplía nuestros conocimientos acerca de la carga eléctrica. Se revela una nueva propiedad fundamental de las cargas: la capacidad de entrar en interacción con las fuerzas que dependen de las velocidades del movimiento.

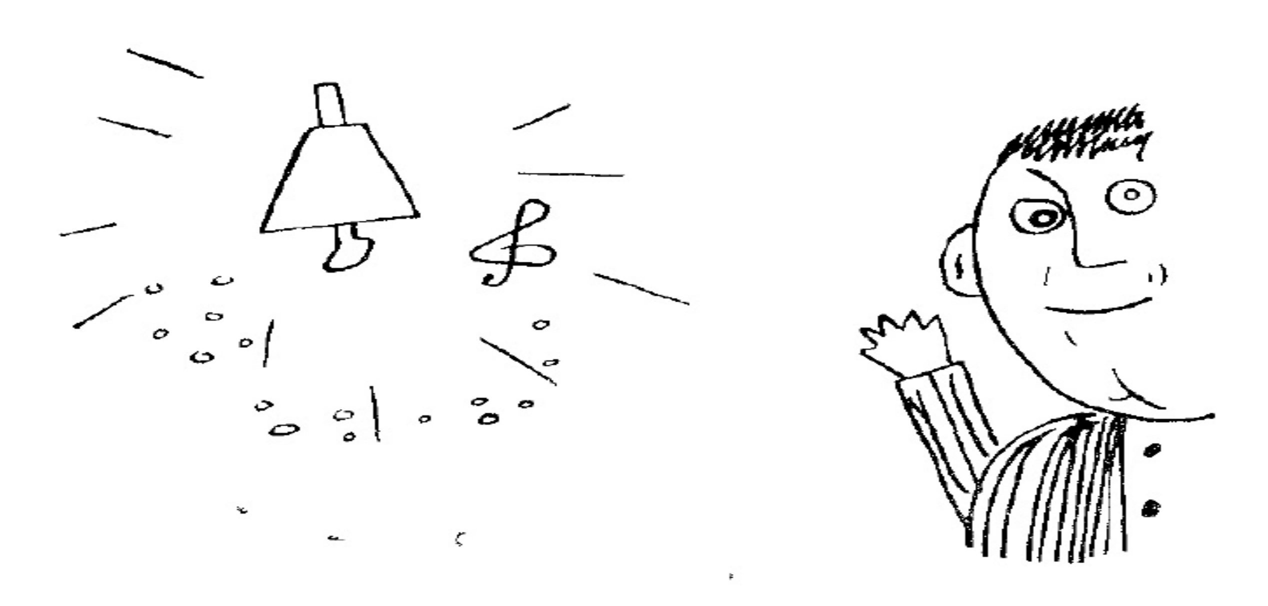
5. ¿Acción próxima o acción a distancia?

Acción próxima

Sí, las leyes de la interacción de las cargas fijas y móviles fueron halladas. Pero no por ello quedó abolida la pregunta de cómo se transmite la fuerza de una carga a otra, análogamente a como el descubrimiento de la ley de la gravitación universal no anuló la cuestión sobre la naturaleza de las fuerzas de gravitación. Ya nos referimos a los problemas surgidos aquí y comunes para la gravitación y el electromagnetismo. Sin embargo, estos problemas son tan importantes que vale la pena volver a examinarlos una vez más o con mayor detalle. Hay que hacerlo con tanta mayor razón que, por primera vez desde el punto de vista histórico, los mismos se plantearon en toda su envergadura precisamente al estudiar los fenómenos electromagnéticos.

Nadie, quizá, supiera dilucidar el quid de la cuestión con tanta claridad como lo hizo Maxwell en el atrículo "Acerca de las acciones a distancia."

Si observamos la acción de un cuerpo sobre otro que se encuentra a cierta distancia del primero —decía Maxwell— entonces, antes de admitir que esta acción es directa e inmediata, estamos inclinados, al principio, a investigar si existe o no entre los cuerpos cierto enlace material: barras, etc. En el caso de existir estos enlaces, preferimos explicar la acción de un cuerpo sobre otro mediante estos eslabones intermedios.



Así, por ejemplo, cuando el conductor de los viejos autobuses que ahora desaparecen gira la manecilla que abre la puerta, resulta que las secciones consecutivas de la barra conectora se comprimen, luego se ponen en movimiento, hasta que, por fin, la puerta se abre*. En los autobuses modernos el conductor hace abrirse la puerta enviando por los tubos aire comprimido al cilindro que controla el mecanismo de la puerta. Tampoco es difícil adaptar para estos fines el imán

* Se sobreentiende quo este ejemplo no pertenece a Maxwell. Durante su vida no existían todavía ningunos autobuses.

eléctrico, enviándole señales por los alambres. Todos estos tres procedimientos de abrir la puerta tienen algo común: entre el conductor y la puerta existe una línea de conexión ininterrumpida en cada punto de la cual se opera cierto proceso físico. Por medio de este proceso tiene lugar la transmisión de la acción, con la particularidad de que esta transmisión no es instantánea, sino posee tal o cual velocidad finita.

Así, pues, señala Maxwell, en muchos casos, la acción entre los cuerpos a distancia puede explicarse por la presencia de ciertos agentes intermedios que transmiten la acción y cuya existencia es completamente evidente. Entonces, cabe preguntar, ¿no sería racional admitir la existencia de cierto agente intermedio también en los casos en que no advertimos ningún medio, ningún intermediario entre los cuerpos en interacción? *Aquí radica la esencia de la concepción de acción próxima.*

Es que, de otro modo, tendremos que decir que el cuerpo actúa allí donde no está.

La persona que no conoce las propiedades del aire puede pensar que la campana sonante actúa directamente sobre nuestros oídos, en tanto que la transmisión del sonido por un medio invisible es absolutamente incomprensible. Sin embargo, en este caso se puede seguir, con pormenores, todo el proceso de propagación de las ondas sonoras y calcular su velocidad.

Y he aquí, dice Maxwell, que muchas cabezas se enfrascaron en las reflexiones acerca de los flujos invisibles que rodean los planetas* y los imanes, acerca de las atmósferas también invisibles en torno a los cuerpos electrizados. A veces, estas reflexiones fueron muy ingenio-

* Acuérdense de nuestro relato sobre las fuerzas gravitacionales.

sas, pero tenían un defecto muy importante: quedaron completamente infructuosas, sin ofrecer nada a la ciencia.

Acción a distancia

Así seguían las cosas hasta que Newton estableciera la ley de la gravitación universal, no obstante, sin dar explicación alguna de su acción. Los éxitos en la investigación del sistema solar que siguieron tras este descubrimiento cautivaron hasta tal punto la imaginación de los científicos que éstos, en su mayoría, comenzaron a inclinarse, en general, a la idea de que las búsquedas de un mecanismo cualquiera no son necesarias.

Surgió la concepción de la acción directa a distancia inmediatamente a través del vacío. Los cuerpos son capaces de percibir directamente su mutua presencia sin medio alguno.

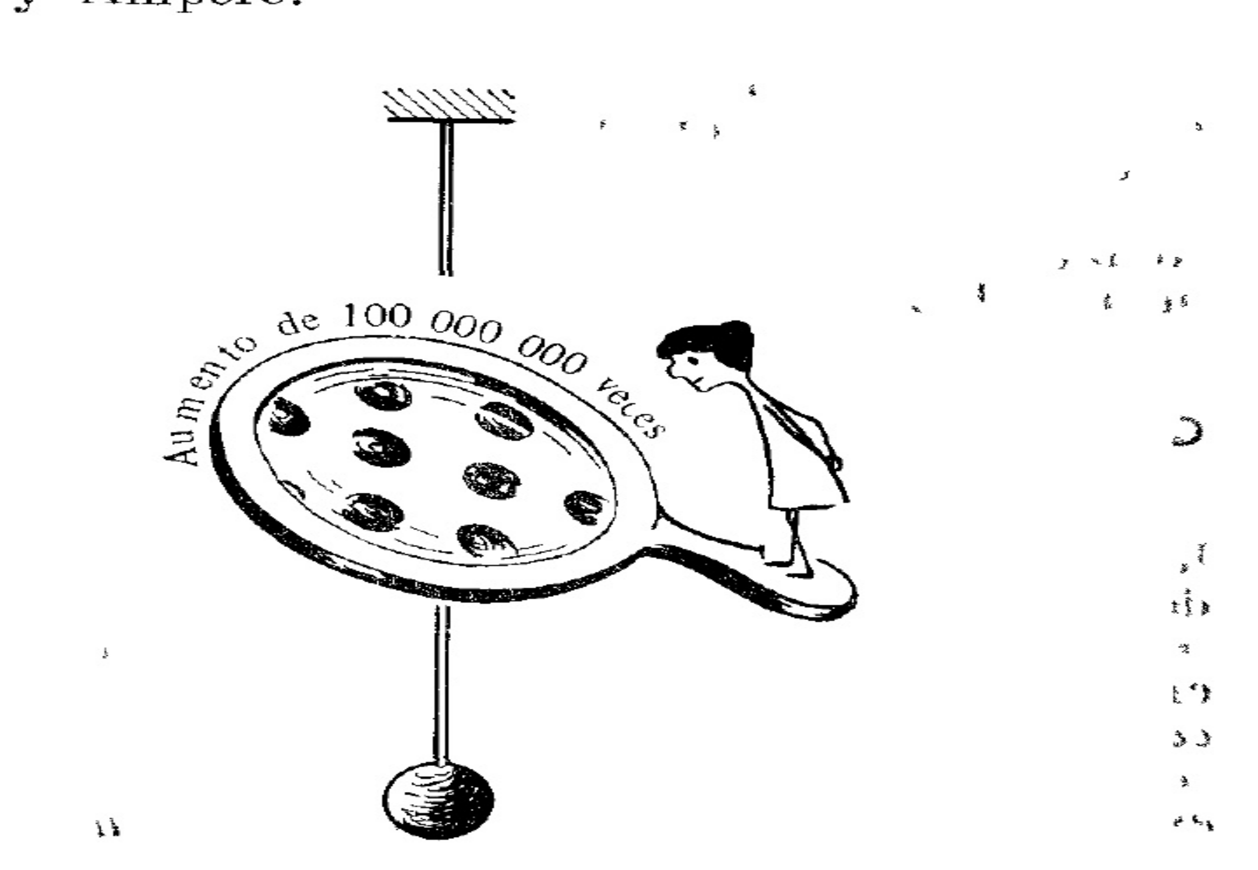
Con frecuencia, se emprendieron tentativas de respaldar la concepción de la acción a distancia con la autoridad de Newton, aunque esto, como ya hemos mencionado antes, no correspondía a la realidad.

Ni mucho menos no desconcertaba a los partidarios de la acción a distancia, la idea sobre la acción del cuerpo allí donde éste, en sí, no está presente. ¿Acaso —razonaban ellos— no vemos cómo el imán, directamente a través del vacío, atrae cuerpos y, además, la fuerza de atracción, en este caso, no varía de modo considerable si el imán se envuelve en papel o se coloca en un cajón de madera? Más aún, incluso si nos parece que la interacción de los cuerpos está provocada por el contacto directo, en realidad no es así. Hasta durante el contacto más estrecho entre los cuerpos queda un pequeño huelgo. Es que la carga suspendida de un hilo no rompe a éste, aunque entre los átomos aisla-

dos que constituyen dicho hilo también se tiene vacío. La acción a distancia, lejos de ser imposible, resulta presentarse como el único modo de actuar que se encuentra por doquier.

La acción próxima no existe en la naturaleza, sino, únicamente, en las cabezas de los adeptos de esta concepción, pues, esta idea se basaba en la burda experiencia de los tiempos antecientíficos cuando el contacto se consideraba indispensable para la interacción, pero no se comprendía que no existía ningún contacto directo, y sólo se tenía la acción a distancias tan pequeñas que no se podían medir con los métodos de observación imperfectos.

Como ve el lector, la argumentación contra la acción próxima resultaba ser bastante fuerte. Más aún, ésta se corroboraba con los remarcables éxitos alcanzados por los partidarios tan convencidos de la acción a distancia como Coulomb y Ampère.



Si la ciencia se hubiera desarrollado rectilíneamente, no habría quedado duda alguna en el triunfo definitivo de la acción a distancia. Pero, en la realidad, la línea del desarrollo recuerda más bien no una recta, sino una espiral. Al pasar una vuelta de la espiral regresamos otra vez a las mismas ideas, aproximadamente, pero ya en un nivel más alto. Precisamente esto ocurrió en la evolución de la concepción de la acción próxima.

Los éxitos en el descubrimiento de las leyes de la interacción de las cargas eléctricas no estaban relacionados orgánicamente con la idea sobre la acción a distancia. Es que la investigación experimental de las propias fuerzas no presupone, ni mucho menos, unas ideas determinadas acerca de cómo estas fuerzas se transmiten. En primer término, se requería hallar la expresión matemática de las fuerzas y "explicarlas" ya se podía más tarde.

Los alcances de los partidarios de la acción a distancia no fueron sino la primera indicación del carácter infundado de los intentos de explicar las leyes fundamentales de la naturaleza por unos u otros cuadros mecánicos patentes tomados de la experiencia cotidiana y, ciertamente, burda.

Campo electromagnético de Faraday

Un viraje decisivo hacia las ideas acerca de la acción próxima lo realizó Faraday, creador de las ideas básicas de la teoría del electromagnetismo, y Maxwell lo llevó a su consumación definitiva. *De acuerdo con Faraday, las cargas eléctricas no actúan unas sobre otras directamente. Cada una de éstas engendra en el espacio circundante campos eléctrico y magnético*



(en el caso de moverse). Los campos de una carga actúan sobre la otra, y viceversa.

La base de las ideas de Faraday sobre el campo eléctrico la constituyó el concepto de las líneas de fuerza que parten en todas las direcciones de los cuerpos electrizados. Estas líneas que señalan la dirección de la acción de la fuerza eléctrica en cada punto fueron conocidas ya hace mucho tiempo. Se observaron y estudiaron como un fenómeno curioso.

Si los pequeños cristales oblongos de un dieléctrico (por ejemplo, de quinina) se agitan bien en un líquido viscoso (por ejemplo, aceite de ricino), entonces, cerca de los cuerpos cargados dichos cristales se alinearán en cadenas, formando líneas de forma más o menos caprichosa en dependencia de la distribución de las cargas.

Es posible restrear las líneas de fuerza junto a la superficie de la Tierra antes del comienzo de la tormenta.

De la misma manera, con la ayuda de las simples limaduras de hierro en las cercanías de los conductores con corriente se pueden observar líneas magnéticas de fuerza.

Faraday fue el primero quien renunció a considerar las líneas de fuerza como un mero procedimiento para abarcar con una sola mirada las direcciones de la resultante de las fuerzas de acción a distancia procedente de los cuerpos electrizados o de las corrientes en diferentes lugares: un resultado complejo de las leyes sencillas. Según Faraday, las líneas de fuerza representan un reflejo palmario de los procesos reales que se operan en el espacio cerca de los cuerpos electrizados o de los imanes. Además, Faraday impartió a la concepción de las líneas de fuerza una admirable claridad y precisión. De conformidad con Faraday, la distribución de las líneas de fuerza presenta el cuadro del campo



eléctrico cerca de las cargas o del campo magnético en las cercanías de los imanes y los conductores.

"Faraday —escribió Maxwell— vio con la ayuda de su don de imaginación las líneas de fuerza atravesando todo el espacio. Allí donde los matemáticos advertían los centros de tensión de las fuerzas de acción a distancia, Faraday distinguía un agente intermedio. Y donde éstos no veían nada, salvo la distancia, quedándose satisfechos con hallar la ley de la distribución de las fuerzas actuantes sobre los fluidos eléctricos, Faraday buscaba la médula de los fenómenos reales transcurridos en el medio". Sin ser matemático y no teniendo la posibilidad de seguir el desarrollo del pensamiento de sus colegas como Ampère, tan brillantes eruditos en las matemá-

ticas, Faraday, no obstante, valiéndose de las líneas de fuerza, supo comprender a fondo los más complejos problemas de la electrodinámica. Y no cabe duda que precisamente estas ideas lo llevaron a una serie de descubrimientos de importancia trascendental.

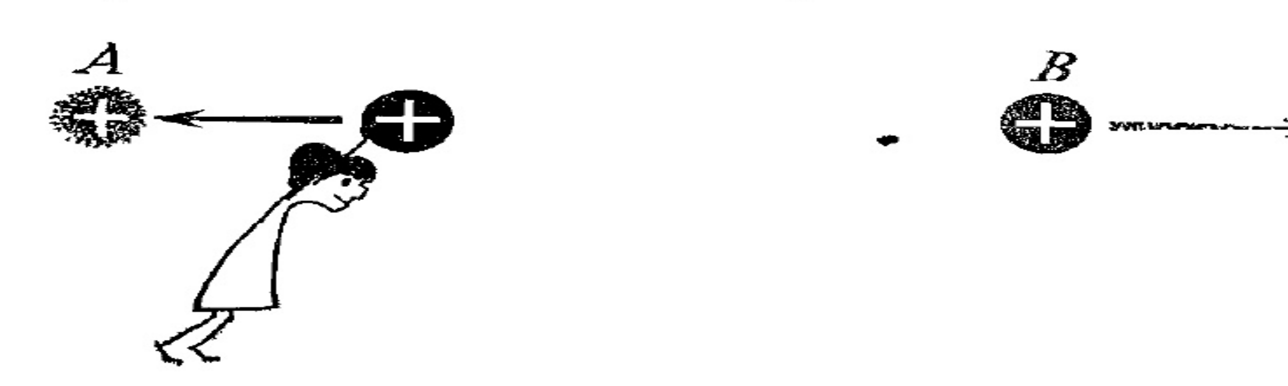
Sus contemporáneos, cautivados por el éxito de los trabajos de Ampère y de otros científicos que gozaban de gran prestigio en el campo de la acción a distancia acogieron con bastante frialdad las ideas de Faraday, pero, al mismo tiempo, seguían con interés sus descubrimientos experimentales. He aquí lo que escribió uno de ellos: "De ningún modo puedo imaginarme que alguien quien tenga noción sobre la coincidencia existente entre el experimento y los resultados del cálculo basado en la admisión de la ley de la acción a distancia pudiera vacilar, aunque sea durante un instante, en la cuestión de a qué dar su preferencia: a esta acción clara y comprensible o a algo tan confuso y nebuloso como las líneas de fuerza".

El campo electromagnético existe

Sea como fuere, los partidarios de la acción a distancia poco tiempo pudieron sentirse orgullosos por la elegancia matemática y la precisión de teorías. El gran compatriota de Faraday Maxwell supo dar a las ideas de Faraday una forma cuantitativa exacta tan necesaria en la física. Escribió el sistema de ecuaciones del campo electromagnético, sistema que se hizo inmortal. En particular, se puso de manifiesto que las leyes descubiertas por Coulomb y Ampère, precisamente en el lenguaje del campo se expresan de un forma más plena, profunda y, al mismo tiempo, elegante desde el punto de vista matemático. Desde aquel período, las ideas sobre

el campo electromagnético comenzaron a conquistar simpatías cada vez mayores entre los hombres de ciencia. Sin embargo, la victoria completa llegó algo más tarde, al cabo de 50 años, aproximadamente, después de la formulación de las ideas principales de Faraday.

Maxwell supo demostrar teóricamente que las interacciones electromagnéticas se propagan con una velocidad finita, y esta velocidad es de la luz en el vacío: $c = 300\,000$ km/s. Este hecho significa que en el caso de trasladar algo cierta carga *A*, la fuerza de Coulomb que actúa sobre la carga *B no variará instantáneamente, sino al cabo del tiempo* $t = AB/c$. Es un resultado fundamental que pone cruz y raya en la concepción de la acción a distancia. En efecto, entre las cargas en el vacío tiene lugar cierto proceso*, y como resultado, la interacción entre las cargas se propaga con una velocidad finita. Es verdad que semejante experimento es difícil de realizar debido a la gran velocidad de propagación del proceso. Pero no es necesario hacerlo. De la teoría de Maxwell se derivaba un hecho fundamental: el campo electromagnético posee una especie de inercia. Para una rápida variación de la velocidad de la carga el campo concomitante se desprende de la misma



* Más tarde analizaremos qué representa este proceso.

a semejanza de cómo todos los objetos no sujetados se ven arrancados de sus lugares durante la aceleración brusca del tren. Los campos desprendidos de la carga comienzan su existencia independiente en forma de ondas electromagnéticas. Actualmente, este hecho es de conocimiento común, pues tal proceso tiene lugar durante el trabajo de cualquier estación de radio. La misión de ésta consiste en la emisión de ondas electromagnéticas. Y si la estación cesa su trabajo, las ondas electromagnéticas engendradas por ella seguirán todavía errando en el espacio durante un plazo prolongado, hasta que sean absorbidas por los cuerpos.

En este ejemplo y en otros similares el campo electromagnético interviene como algo tan real como la mesa junto a la cual estamos sentados, y ya es imposible volver las espaldas a las ideas sobre el campo, pretextando que es algo complicado, que enreda las cosas simples, como pensaron los partidarios de la acción a distancia.

La idea acerca de que el cuerpo puede actuar directamente allí donde este cuerpo está ausente, idea que en el primer momento de su aparición se concebía como una adsurdidad contradiciendo a sí misma, fue refutada experimentalmente, a pesar de que —como parecía en un período— el propio desarrollo de la ciencia requere su reconocimiento, mientras que los dogmatos de la acción próxima que paralizan el pensamiento creador deben ser rechazados.

6. ¿Qué son el campo eléctrico y el campo magnético?

Una cuestión "martirizante"

¿Qué son el campo eléctrico y el magnético? Esta pregunta es la más martirizante para persona

que aspira a comprender la esencia de aquellas magnitudes principales con las cuales opera la física moderna, pero que no tuvo tiempo todavía de dedicarse a su estudio fundamental, o bien, que ya perdió la esperanza de trabajar en este ámbito. No es casual que entre las preguntas encerradas en distintos sobres que diariamente invaden las mesas de las redacciones de las revistas y editoriales dedicadas a las publicaciones de divulgación científica esta pregunta se encuentre con mayor frecuencia. La carga eléctrica despierta entre los que preguntan un interés mucho menor, aunque en este caso el asunto no es, de ningún modo, más simple que cuando se trata del campo. Probablemente, esto sea debido al hecho de que con la carga está vinculado algo tangible, o sea, el cuerpo electrizado, y con el campo, no.

Con este motivo se dirigen a las redacciones diferentes personas que, habitualmente, conocen el conocepto de campo gracias a los manuales de escuela o artículos de divulgación científica. Con frecuencia, expresan su perplejidad preguntando por qué en ningún lugar pueden encontrar una definición tal del campo que les pueda satisfacer. Solamente los estudiantes no escriben. Ya sea que comienzan a comprender que aquí es imposible limitarse a varias frases, o bien, porque tienen dónde obtener las explicaciones correspondientes.

El campo electromagnético y el éter

Aquí la situación está lejos de ser simple. Las ideas iniciales acerca de las líneas de fuerza a las cuales llegó Faraday y, en pos de él, también Maxwell, nacieron en la época del triunfo de la mecánica newtoniana. Ésta pareció universal y omnímoda. Los postulados de Newton

hace mucho que dejaron de percibirse como hipótesis edificadas sobre el fundamento experimental. Se les consideraba casi como si fueran evidentes de por sí.

Ni a Coulomb, ni tampoco a Ampére nunca, jamás se les ocurrió siquiera apartarse en lo más mínimo de las posiciones de Newton. Es que ellos solamente investigaban nuevos tipos de fuerzas. ¡Y a las fuerzas en la teoría newtoniana se permite ser tales como se quiera!

En esencia, también Faraday sostenía las mismas posiciones, aunque, por cierto, con la sustancial diferencia de que éste no reconocía la acción a distancia. No satisfacía a Faraday el saber escribir sólo las fórmulas que daban la posibilidad de expresar las fuerzas electromagnéticas por medio de distancias, velocidades, etc. El científico trataba de figurarse de modo patente el *mecanismo* de aparición de estas fuerzas. Su mecanismo, cabe notar, en el sentido más literal de la palabra. Ello (a la par de los experimentos con las limaduras de hierro y los pedacitos del dieléctrico) fue, precisamente, lo que llevó a Faraday a la formación de la idea sobre las líneas de fuerza como sobre algo que recordaba, en alto grado, hilos elásticos comunes y corrientes (aunque invisibles y, en general, que escapaban del control directo por los órganos de los sentidos).

¡Sí, por muy paradójico que suena esto en la actualidad, tanto Faraday, como Maxwell sostenían la posición de la explicación *mecánica* de los fenómenos electromagnéticos!

Al adoptar la hipótesis de conformidad con la cual todo el espacio está lleno de un medio especial omnipenetrante, el éter, procuraron reducir todos los fenómenos electromagnéticos a los movimientos mecánicos en el éter y a las tensiones mecánicas en su interior. Muchas co-

as en la teoría moderna hacen recordar esto. Hasta el día de hoy, en los libros se escribe aunque, por cierto, impartiendo a las palabras un nuevo sentido) sobre las "tensiones" relacionadas con el electromagnético, sobre los flujos y torbellinos.

A veces, los destinos de los descubrimientos científicos resultan sorprendentes. Por ejemplo, Fourier, basándose en la idea absolutamente errónea acerca del calórico, fluido que, supuestamente, es el portador del calor, creó la teoría matemática certera de la conductividad del calor. Y nosotros utilizamos esta teoría incluso hoy en día. Faraday y Maxwell erigieron el edificio armonioso de la teoría del electromagnetismo apoyándose en las ideas mecánicas.

En este último caso fue particularmente asombrosa la lógica del desarrollo de las ideas. El éter resultó ser una criatura que carecía absolutamente de viabilidad. Se podía aún avenirse a la necesidad de atribuirle unas propiedades exóticas. Por ejemplo, la combinación de enorme elasticidad con una densidad y viscosidad ínfimas. Pero, poco a poco, se pusieron de manifiesto circunstancias que lanzaron un reto no sólo a los requerimientos de representación patente (esto no es tan horrible), sino también a la propia integridad lógica de la teoría. Así, por ejemplo, en unos experimentos el éter (si éste existe) debía arrastrarse en pos de los cuerpos en movimiento. ¡Arrastrarse por completo! De otros experimentos se deducía que este arrastre debía ser parcial. Por fin, también se daban experimentos que enunciaban en la misma tajante: ¡no existe ningún arrastre! El medio hipotético se mostró absolutamente inatrapable.

Las contradicciones mencionadas conmovieron las ideas acostumbradas sobre el éter, que ya se arraigaron entre los físicos. La idea del éter mecánico fue enterrada por la teoría de la relatividad de Einstein. *Se averiguó que, lejos de poder construir una mecánica aunque en cierto grado satisfactoria del éter, es imposible siquiera descubrir el movimiento con respecto a éste.*

Lo remarcable es que este descubrimiento no desalojó ni un solo ladrillo en el armonioso edificio de las leyes del campo electromagnético formuladas matemáticamente por Maxwell. ¡Las ecuaciones permanecieron intactas! O, mejor dicho, conservaron su aspecto exterior de antes, pero su "médula", el sentido de los términos "campo eléctrico", "campo magnético" llegó a ser completamente distinto. Así, las líneas de fuerza, de acuerdo con la teoría moderna, son la representación palmaria de la distribución del campo en el espacio, y *no, de ningún modo*, cuerdas tensadas de un mecanismo invisible. En este sentido no son más reales que los meridianos y paralelos en el globo geográfico.

Existe una vieja anécdota acerca de cómo funciona el telégrafo sin hilos. "Figúrense una campanilla. Está atada a ésta una cuerda. Sujeto en la mano su otro extremo. Tiro de la cuerda. La campanilla suena. ¿Se comprende? Bueno, y ahora lo mismo, pero sin cuerda".

Para muchos físicos el éter representó aquella misma cuerda que convertía todo en lo acostumbrado y comprensible. "Aquella misma" electrodinámica pero "sin cuerda" requirió una nueva intelección de muchas concepciones.

Sin embargo, se puede decir que los partidarios de la acción a distancia tenían razón en un aspecto. Se equivocaban al refutar el agente

intermedio que condicionaba la interacción. Pero, al mismo tiempo, tenían razón cuando ridiculizaban los intentos de explicar estas interacciones mediante cierto mecanismo imperceptible, mecanismo cuya estructura debía ser tal que nos presentase precisamente aquello que observamos en la realidad, y nada más. Si el éter no existe, no se deben abrigar esperanzas de que sea posible reducir los fenómenos electromagnéticos a la mecánica, la que sea muy peculiar y sofisticada, pero, en todo caso, mecánica de Newton.

Pero, si esto es así, entonces, como consecuencia, al estudiar el campo electromagnético, nos encontramos con cierta materia (en cuanto a la materialidad del campo electromagnético, ésta no se debe poner en tela de juicio) la cual *¡no se somete a las leyes de Newton!* Ésta se describe por medio de sus leyes específicas cuya anotación matemática son las ecuaciones de Maxwell.

¡Éste es uno de los descubrimientos más fundamentales! Por primera vez en toda la historia de la ciencia, en el sentido actual de esta palabra, apareció una idea profunda: existen diferentes especies de la materia, y cada una de éstas se describe por medio de sus leyes no parecidas a otras, aunque en algunos puntos éstas entran en contacto. El día en que el éter mecánico fue expulsado de la física se convirtió en el día de nacimiento de esta idea. Pero, ¿qué materia es esta? Qué definición puede darse a los conceptos de campos eléctrico y magnético?

¿Qué significa explicar?

Ahora tenemos por conocer un razonamiento largo y, probablemente, aburrido cuyo único fin consiste en justificarnos de que es imposible dar una definición del campo que, en el acto, nos satisfaga.

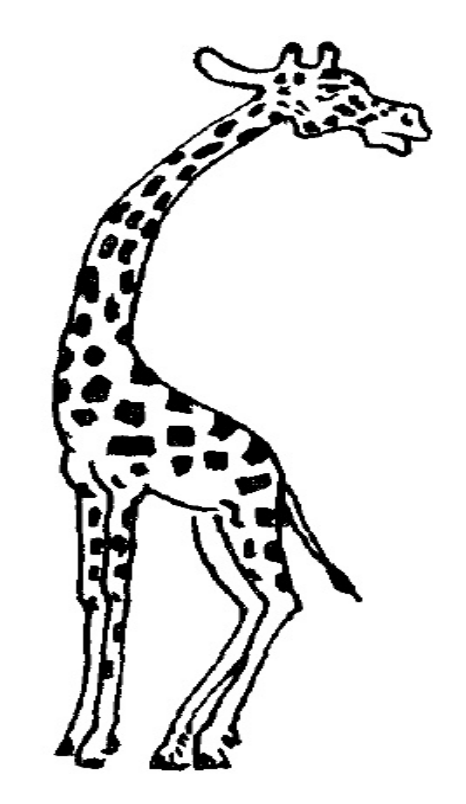
Recuerden, ¿cómo puede explicar qué representa tal o cual cosa? Por supuesto, lo primero que nos ocurre es *indicar* simplemente esta cosa con el dedo (a pesar de que esto no siempre se corresponde con los buenos modales); entonces, los *órganos de los sentidos* de su interlocutor, sin ninguna ayuda por su parte, le comunicarán una gran cantidad de datos valiosos. Si el objeto no está al alcance de la mano o si es invisible, entonces (ya será lo segundo) se puede *contar* detalladamente *sobre sus propiedades*. Por fin, si hay necesidad de ello, se puede relatar de qué se compone el objeto de su coversación, es decir, contar sobre la *estructura del objeto*.

Estamos acostumbrados a que se puede utilizar cualesquiera de estos métodos. En algunos casos es preferible el uno, en otras ocasiones, el otro método. Por ejemplo, es bastante difícil explicar qué es la jirafa, pero es suficiente mirarla una sola vez para nunca en adelante confundirla con algo otro. Por el contrario, cuando se trata de las emociones del hombre sorprendido en las montañas por una avalancha de nieve, es preferible conocerlas por su relato. Y el modo más simple de formar la idea sobre un objeto tal como el átomo es el conocimiento de su estructura. A propósito, en este caso, el primer método, en general, es inútil. El átomo es tan pequeño que es imposible verlo o palparlo.

Con frecuencia, los tres métodos son aplicables en igual medida, y puede elegirse cualquiera de éstos en dependencia del carácter y el grado de interés que despierta en nosotros el objeto.

Por ejemplo, si se quiere enterarse de qué es la glucosa, se puede abrir la enciclopedia u otro manual y leer la descripción de sus propiedades. De este modo se averigua que se trata de cristales incoloros que funden a la temperatura de 146°C, cuyo sabor es dos veces, aproxi-

madamente, menos dulce que el del azúcar de remolacha, etc. La lista de las propiedades será bastante amplia.



Seguidamente, se puede conocer la estructura de la glucosa. Aquí se da a conocer que se compone de carbono, hidrógeno y oxígeno. La molécula de glucosa contiene seis átomos de carbono, seis de oxígeno y doce átomos de hidrógeno enlazados entre sí de una forma determinada.

Por fin, sencillamente, se puede conseguir de algún modo un cristal de glucosa y examinarlo para ver qué es esto.

La idea más profunda sobre un objeto, la que le proporciona plena satisfacción, el científico o el hombre que se interesa por la ciencia la forma cuando conoce la estructura de dicho objeto. Particularmente, si basándose en esta estructura es posible explicar las distintas propiedades del objeto. En ello radica, principalmente, la finalidad de la ciencia.

Sin embargo, existen objetos para la explicación de cuya esencia no sirven ni el primer método ni el tercero. Estos objetos no se perciben directamente por nuestros órganos de los sentidos, y no podemos decir nada sobre su estructura. Precisamente a semejantes objetos pertenecen los campos eléctrico y magnético. El hecho de que estos campos no afectan nuestros sentidos no es por sí muy grave, a pesar de que no es fácil convencernos de la realidad de aquello que no percibimos de manera directa. Es que tampoco percibimos con los sentidos los átomos, pero nos habituamos a éstos sin mucha dificultad. Sin embargo, cuando se trata del campo, los asuntos toman otro cariz, más complicado, en el sentido de que no se puede decir nada sobre su estructura. Esta situación es completamente insólita. Sólo tiene lugar para los objetos más simples (elementos, como decían los antiguos) entre aquellos que conocemos para el día de hoy. *Y no sabemos nada más primario que el campo electromagnético*. Precisamente por esta razón no podemos decir nada sobre su estructura.

En cualquier etapa de la evolución de la ciencia nos encontramos con entes primitivos de este género que no se pueden descomponer en elementos integrantes por la mera razón de que tales no se conocen. Los filósofos de la Antigüedad reconocían como primarios cuatro elementos: el agua, el aire, el fuego y la tierra. Sucesivamente, se tomaban por tales los átomos, y ahora, las partículas elementales y los campos. La cuestión puede formularse solamente de la siguiente forma: ¿serán descubiertos, en el futuro, objetos más simples que podrían considerarse como partes integrantes de los campos y de las partículas? Por ahora, aquí no se puede decir nada absolutamente fidedigno.

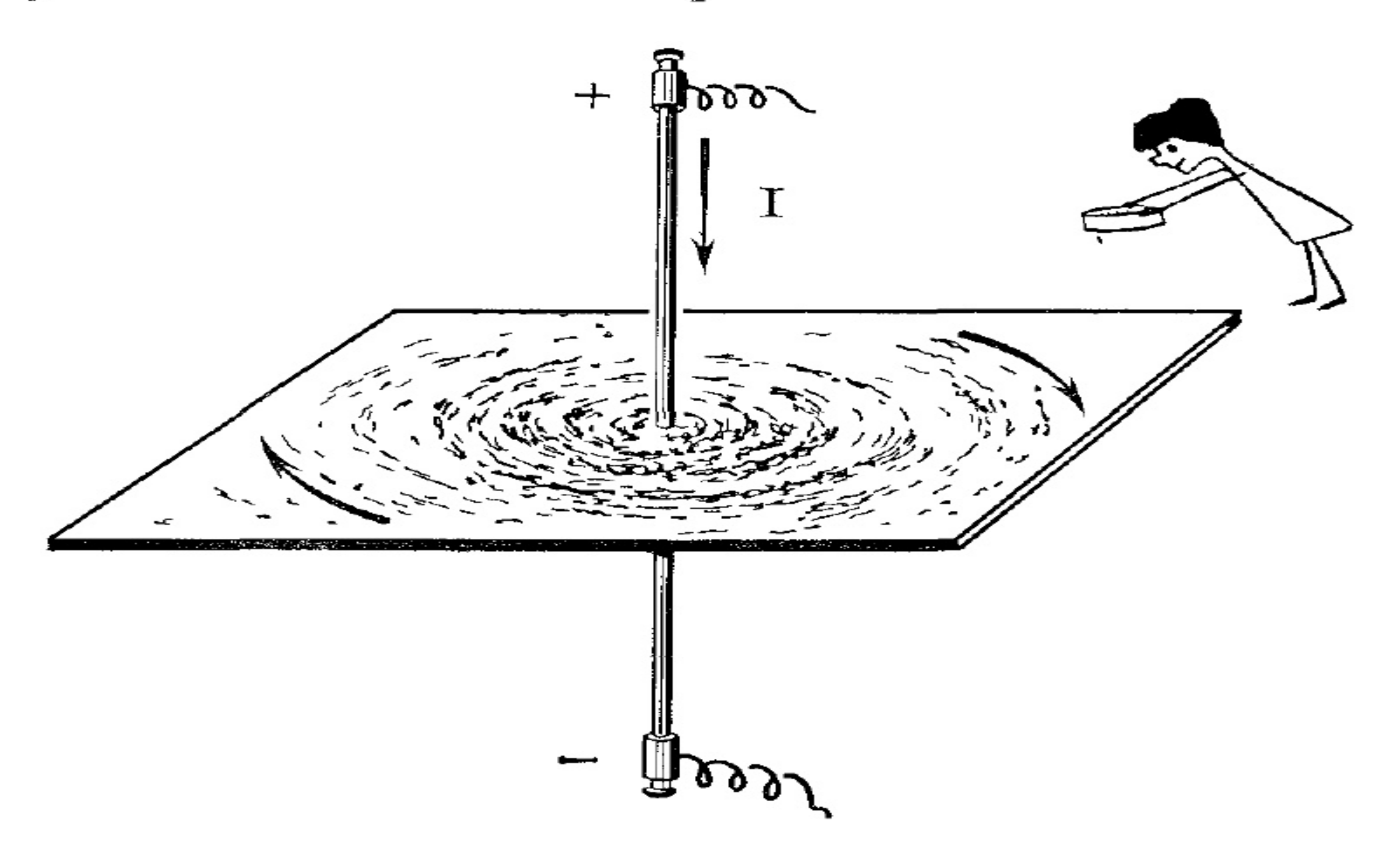
Inmediatamente, tenemos que prevenir al lector contra las tentativas de figurarse el campo de una forma demasiado simplificada. A uno siempre le hace cosquillas relacionar con la partícula elemental un imagen patente de esta índole: una bolita o algo por el estilo, perfilado nítidamente en el espacio discontinuo. Y con el campo, en nuestra cabeza, se liga de por sí algo continuo, que llena el espacio, análogamente a como el líquido llena un recipiente. Precisamente semejantes concepciones reinaban en la ciencia a finales del siglo pasado: el electrón se consideraba como una bolita cargada, y el campo electromagnético como las tensiones del medio hipotético especial, o sea, del éter. No obstante, en la realidad, este cuadro simple es inadmisible. Basta señalar que, como se ha establecido en la actualidad, el campo electromagnético revela propiedades inherentes a las partículas, mientras que en éstas, a su vez, se descubren propiedades típicamente ondulatorias. Sea como fuere, no vamos a adelantarnos mucho. De otro modo, tendremos que referirnos a las propiedades tan complejas del campo que, por ahora, es todavía temprano revelar.

Propiedades principales del campo electromagnético

Ahora podemos pasar al quid de la cuestión sobre el campo eléctrico (más exactamente, por el momento, sobre el campo electrostático.) *Nuestras ideas acerca de qué es el campo eléctrico, se forman como resultado de la investigación experimental de sus propiedades.* Por otro camino estas propiedades no se pueden hallar. *La propiedad principal del campo eléctrico es la capacidad de actuar con cierta fuerza sobre las cargas eléctricas (tanto inmóviles, como las en mo-*

vimiento). Por la acción sobre la carga se establece la presencia del campo, su distribución en el espacio y se estudian todas sus características.

El campo eléctrico se engendra por las cargas eléctricas. Se suele considerar que las líneas de fuerza de este campo se inician en las cargas positivas y terminan en las negativas. Las cargas son las fuentes del campo. Por la acción del campo sobre la carga no solamente puede detectarse el mismo. Investigando esta acción se da la posibilidad de introducir una magnitud estrictamente determinada que permite *medir* el campo. Esta magnitud es la intensidad del campo, o sea, la fuerza que actúa sobre una carga positiva unitaria en reposo.



La propiedad principal del campo magnético es su capacidad de actuar con una fuerza determinada sobre las cargas eléctricas en movimiento. El cam-

po magnético se engendra también tan sólo por las cargas eléctricas en movimiento. Las líneas de fuerza del campo magnético abarcan las corrientes en forma de líneas cerradas que no tienen comienzo ni fin.

Basándose en los descubrimientos de Coulomb y Ampère, Maxwell formuló las leyes exactas que determinan la magnitud de los campos eléctrico y magnético en función de la distribución de las cargas y corrientes en el espacio.

¿Cuál es la actitud de los científicos frente a los conceptos fundamentales?

Conviene decir, además, varias palabras acerca del comportamiento de los propios físicos respecto a los conceptos de tal tipo como el campo. La definición del campo y la enumeración de sus propiedades que acabamos de dar, a todas luces, parecerá, a muchos lectores expresamente insuficiente. ¿No sería conveniente, *en primer lugar*, encaminar todas las fuerzas para conseguir mayor claridad en el problema del campo, tratando de esclarecer detalladamente su naturaleza?

El punto de vista de los científicos sobre el particular es distinto. En los datos sobre el campo de que disponemos los científicos ven, *ante todo*, inmensas posibilidades para la explicación del conjunto de los hechos experimentales. Lo único que se debe tener en cuenta, en este caso, es que como estos datos es necesario entender, por, supuesto, las leyes matemáticas exactamente formuladas que determinan la configuración del campo en dependencia de la disposición de las cargas y de sus velocidades, y no sólo aquellas concepciones cualitativas de las cuales podemos relatar en este libro. Los científicos se dan plena cuenta de que aquí existe la misma situa-

ción que con las fuerzas en la mecánica de Newton. Como recordará el lector, para la mecánica no tiene importancia qué es la fuerza por su naturaleza. Lo que sí importa es a qué es igual la misma y en qué condiciones se origina. En la teoría del campo electromagnético también es importante saber, en primer término, cómo actúa el *campo sobre la carga* y *en qué condiciones* se engendra, y no qué es el campo en sí. La diferencia consiste en que, al salir fuera de los marcos de la mecánica, podemos investigar la naturaleza de las fuerzas, mientras que cuando se trata del campo no estamos en condiciones de proceder de la misma manera, por lo menos, con el estado actual de las cosas.

En esencia, la investigación de la naturaleza de las diferentes fuerzas mecánicas reside en reducirlas a tales o cuales campos. Y los propios campos, en todo caso ahora, no se puede reducir a algo más elemental.

No hay duda de que, tarde o temprano, nuestros datos sobre los campos llegarán a ser más profundos. Pero los datos de que disponemos actualmente no nos permiten internarse en la maraña de las conjeturas cuestionables acerca de cuál es el "mecanismo" de la acción del campo sobre las cargas. Hay que satisfacernos con lo expuesto. Es imposible el retorno a los primeros intentos de la comprensión mecánica del campo. El afán de penetrar de una vez en la "propia esencia" del campo, en lugar de proceder a la labor duradera, ardua y extraordinariamente importante. consistente en la explicación de los fenómenos concretos sobre la base de lo conocido y la búsqueda de las nuevas propiedades del campo, este afán sólo aparentemente es digno de elogio, mientras que, en la realidad, hay que deshacerse de él.

La actitud de los científicos respecto al campo

puede compararse con la de Sobakiévich, uno de los personajes de la novela de Gógol, respecto a la cosa tan sutil como las "almas muertas". En primer lugar, a Sobakiévich le interesó el provecho que podía sacar de éstas. "¿Le hacen falta almas muertas? —preguntó Sobakiévich (a Chíchikov) de una manera muy sencilla, sin menor asombro, como si se tratara de pan—... Está bien, estoy dispuesto a vender". (Gógol, *Las almas muertas*)*. En todo caso, la actitud del hombre de ciencia con respecto al campo no se parece en nada a la de Manílov.

Manílov, otro personaje de la novela mencionada, hizo un intento de entender qué son, en fin de cuentas, las "almas muertas", pero, al ver que esto es superior a sus fuerzas, se limitó a expresar sus temores de si su venta o negocio serían "incorrespondientes a las directivas civiles y las perspectivas futuras de Rusia". Al obtener las aseveraciones de lo contrario, se tranquilizó por completo.

Se sobreentiende que los científicos procuran investigar más a fondo las propiedades del campo. Pero comprenden bien que la naturaleza guarda sus enigmas mucho mejor que guardaba Chíchikov el secreto de las "almas muertas".

Los hombres de ciencia consideran que hacer hipótesis a guisa de aquellas que promovían las señoras "agradables en todos los aspectos" y los funcionarios de la ciudad N, capital de la provincia, con motivo de las "almas muertas" es una ocupación más que inútil, es perjudicial. Tomando este camino, sólo se puede convertir

---

* No quisiéramos que el lector llegue a pensar que un hombre de ciencia, por su carácter, es copia de Sobakiévich. El parecido entre éstos no radica en el fin de la utilización de los "objetos misteriosos", sino en la capacidad de advertir en estos objetos cosas útiles en la práctica.

la ciencia en composición de anécdotas entretenidas que se asemejaban por su veracidad a la "Narración sobre el capitán Kopeikin" o la historieta "Sobre el rapto de la hija del gobernador".

Actualmente ni siquiera podemos afirmar con seguridad que *en el futuro* se descubrirán entes "más primarios" que los campos y las partículas elementales.

La naturaleza es inagotable en sus propiedades. Es inagotable, como lo subrayó Lenin, el electrón. En igual medida, es inagotable por sus propiedades también el campo electromagnético. Por esta causa, nunca se interrumpirá el proceso de la cognición cada vez más profunda de las propiedades del campo. Pero, ¿son divisibles hasta lo infinito las formaciones elementales conocidas para el día de hoy? Todo el conjunto de heshos nos dice que, más probablemente, no lo son. Si esto es así, el progreso ulterior en la investigación de los campos y de las partículas elementales estará relacionado únicamente con el descubrimiento de unas propiedades cada vez más profundas. Por ahora, nos hemos detenido tan sólo en algunas propiedades más importantes, sin exponer todo aquello que se conoce sobre el campo en la ciencia moderna.

Ahora se puede pasar a otras propiedades fundamentales del campo electromagnético.

7. Relación recíproca existente entre los campos eléctricos y magnéticos

Nuevas propiedades del campo electromagnético

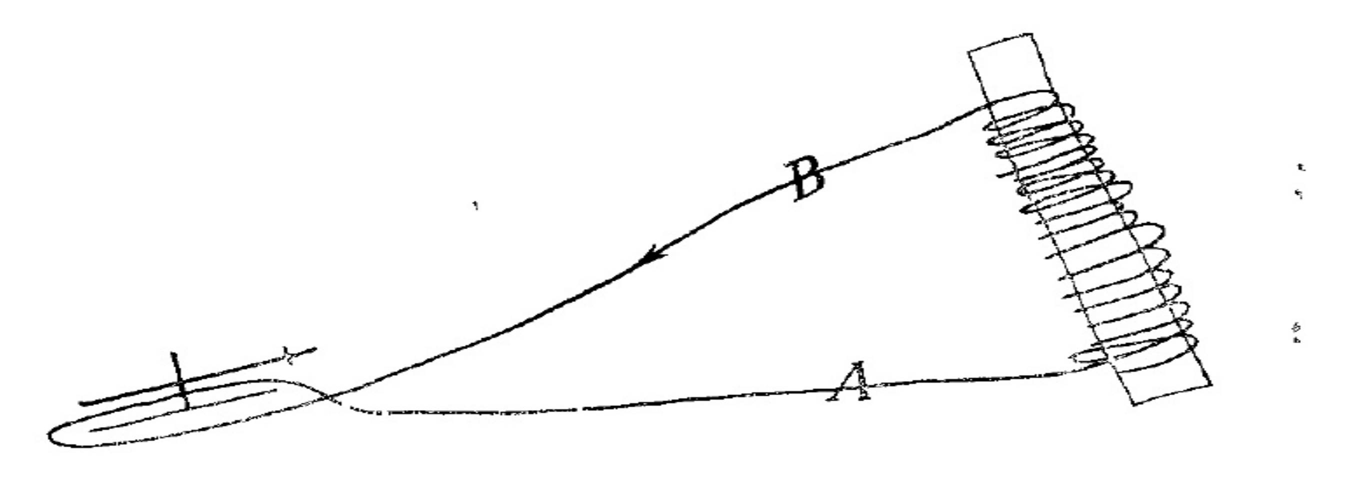
Si las cargas inmóviles hubieran creado el campo eléctrico, y las cargas en movimiento, el mag-

nético, y nada más, entonces, la familia de las fuerzas electromagnéticas no habría llegado a ser tan amplia como lo es en la realidad. Más aún, no se podría afirmar de una manera certera que estos campos son una realidad cuya existencia en el mundo es tan incuestionable, como, por ejemplo, la del autor del libro para sus lectores. Los científicos (partidarios de la acción próxima) se encontrarían en la posición de los autores novatos no seguros de antemano de que hallarán a su lector.

Únicamente el descubrimiento de nuevas propiedades de las interacciones electromagnéticas las cuales sólo con enormes dificultades podían interpretarse en el lenguaje de la acción a distancia (como se hizo para las leyes de Coulomb y Ampère) cambió por completo la situación. Los campos eléctrico y magnético se vieron vinculados de un modo estrechísimo. El campo magnético en determinadas condiciones, es capaz de engendrar el campo eléctrico sin la ayuda de las cargas, mientras que el campo eléctrico puede crear directamente el campo magnético. Es precisamente así, el campo magnético engendra tan sólo el eléctrico, y el eléctrico, tan sólo el magnético, aunque este último, a su vez, es capaz de crear el eléctrico. Algo parecido se puede observar en el mundo de los insectos: la oruga se transforma solamente en mariposa y la mariposa sólo produce huevos de los cuales salen las orugas, pero las orugas, de por sí, nunca producen directamente a sus semejantes, igualmente que las mariposas.

Inducción electromagnética

No es casual que el primer paso en el descubrimiento de este nuevo aspecto de las interacciones electromagnéticas lo había hecho Miguel Fa-



raday, el fundador de la concepción del campo electromagnético, uno de los más grandes científicos del mundo. Faraday estaba absolutamente seguro de la unidad de los fenómenos eléctricos. Poco tiempo después del descubrimiento de Oersted escribió en su diario (1821): "Transformar el magnetismo en electricidad". Desde esta época, Faraday, sin tregua, pensaba en este problema. Según dicen, siempre llevaba en el bolsillo de su chaleco un imán que le debía recordar sobre la tarea planteada. Al cabo de diez años, como resultado de una labor tenaz y la fe en el éxito, el problema quedó resuelto. Hizo el descubrimiento en que descansa la estructura de todos los generadores de las centrales eléctricas del mundo que transforman la energía mecánica en la de corriente eléctrica. Otras fuentes: pilas galvánicas, acumuladores, células termo y fotoeléctricas producen una fracción ínfima de la energía generada.

La corriente eléctrica, razonaba Faraday, es capaz de imantar un pedazo de hierro. Para conseguirlo es suficiente introducir este pedazo en el interior del carrete. ¿Es posible, acaso, que también el imán, a su vez, sea capaz de originar la aparición de la corriente eléctrica o cambiar su magnitud? Durante largo lapso no se logró detectar nada.

El siguiente hecho curioso ilustra qué tipo de casualidades podía impedir el descubrimiento. Casi simultáneamente con Faraday, el físico suizo Colladon también trató de obtener la corriente eléctrica valiéndose del imán. En su trabajo utilizaba el galvanómetro cuya ligera aguja magnética se disponía dentro del carrete del instrumento. Para evitar que el imán ejerciera acción directa sobre la aguja, los extremos del carrete en el cual Colladon introducía el imán en espera de producir en éste la corriente tenían su salida en la habitación contigua donde se conectaban al galvanómetro. Después de introducir el imán al carrete, Colladon se dirigía a la habitación vecina y veía, con pesar, que el galvanómetro indicaba cero. Si él hubiera observado todo el tiempo el galvanómetro, encargando a otra persona ocuparse del imán, se habría realizado el relevante descubrimiento. Pero este acontecimiento no se produjo. El imán que estaba en reposo respecto al carrete podía encontrarse tranquilamente dentro de éste durante centenares de años, sin provocar la aparición de corriente alguna en el carrete.

Faraday también tropezaba con las contingencias de este tipo por cuanto reiteradas veces trató de obtener la corriente eléctrica con la ayuda de un imán y de la corriente en otro conductor, pero sin éxito.

El descubrimiento de la inducción electromagnética, como denominó este fenómeno el propio Faraday fue hecho el 29 de agosto de 1831*. He aquí la descripción del primer experimento: "En un ancho carrete de madera se arrolló alambre de cobre de 203 pies de longitud, y entre

---

* Es un caso relativamente poco frecuente, cuando la fecha de un nuevo descubrimiento destacado se conoce con tanta precisión.

sus espiras se arrolló alambre de la misma longitud, pero, aislado del primero por hilo de algodón. Una de estas espirales estaba conectada al galvanómetro, y la otra, a una potente batería compuesta por 100 pares de placas... Al cerrar el circuito se lograba advertir una acción súbita pero extraordinariamente débil en el galvanómetro, y lo mismo se observaba al cesar la corriente. En cambio, cuando el paso de la corriente a través de una de las espirales resultaba ininterrumpido, no se logró notar una acción sobre el galvanómetro, ni, en general, alguna acción inductiva sobre otra espiral, a pesar de que el calentamiento de toda la espiral conectada a la batería y la brillantez de la chispa que saltaba entre los carbones eran testimonio de la potencia de la batería" (M. Faraday, *Investigaciones experimentales sobre electricidad*, Serie I).

Así, pues, primeramente fue descubierta la inducción de las corrientes inmóviles una respecto a la otra. Luego, comprendiendo claramente que el cierre y la desconexión correspondían a la aproximación y el alejamiento de los conductores con corriente, Faraday demostró, por vía experimental, que la corriente se engendraba al desplazarse los carretes uno respecto al otro.

Faraday, que conocía los trabajos de Ampère, comprendía también que la corriente es un imán, y el imán, a su vez, es el conjunto de corrientes. Como está registrado en su diario de laboratorio, el 17 de octubre en el carrete fue descubierta la corriente de inducción, en el momento de introducir (o sacar) el imán.

En el curso de un mes Faraday descubrió experimentalmente todas las particularidades esenciales del fenómeno. El amigo de Faraday Tyndall escribió: "Su poderoso intelecto abarcó un vasto campo y apenas si dejó a sus seguidores

para la recolección aunque sea una pizca de los hechos". Sólo quedó dar a la ley una forma cuantitativa rigurosa y poner al descubierto completo la naturaleza física del fenómeno. Ya el propio Faraday captó lo general de que dependía la aparición de la corriente de inducción en estos experimentos los cuales, exteriormente, tenían diferente aspecto. *La corriente se engendra en el circuito cuando varía el número de líneus de fuerza del campo magnético que atraviesan el área limitada por este circuito* (en particular, al variar la magnitud del campo magnético, *que atraviesa el circuito*). Y con cuanta mayor rapidez cambia este número, tanto mayor es la corriente. La causa que provoca la variación del número de líneas de fuerza no tiene ninguna importancia. Puede tratarse de la variación de la intensidad de la corriente (y, por consiguiente, también de su campo), así como del acercamiento de los carretes y del movimiento del imán.

Faraday no sólo descubrió el fenómeno, sino también fue el primero en realizar un modelo, aunque por el momento imperfecto, del generador de corriente eléctrica que transformaba la energía mecánica de rotación en corriente. Era un macizo disco de cobre que giraba entre los polos de un fuerte imán. Al conectar el eje y el borde del disco al galvanómetro, Faraday descubrió la desviación de la aguja. Por cierto, la corriente fue débil, pero el principio hallado, más tarde, dio la posibilidad de construir generadores potentes. Y sin éstos, la electricidad, hasta la fecha, seguiría siendo un lujo al alcance de pocos.

Dirección de la corriente de inducción y conservación de la energía

La corriente de inducción aparecida comienza, de inmediato, actuar recíprocamente con la co-

rriente o el imán que la engendraron. Si acercamos el imán (o el carrete con corriente) al conductor cerrado, la corriente de inducción que aparece repele obligatoriamente el imán. Para conseguir el acercamiento es necesario realizar un trabajo. Cuando el imán se aleja surge la atracción. Esta regla notada por Lenz se cumple de un modo rigurosísimo. Figúrense que las cosas se hubiesen desarrollado de otra manera: usted empuja el imán hacia el carrete, aquél se introduce por sí mismo en su interior y... se habría infringido la ley de conservación de la energía. Es que se habría acrecentado y, simultáneamente, surgiría la corriente, hecho que de por sí requiere consumo de energía, ya que la corriente también puede realizar trabajo. La naturaleza dispuso sabiamente de la dirección de la corriente de inducción con tal de que no cambiasen las reservas de energía. La corriente inducida en el inducido del generador de la central eléctrica, al entrar en interacción con el campo magnético del estator, frena la rotación del inducido. Solamente por esta razón, para la rotación del inducido es necesario realizar un trabajo, tanto mayor, cuanto mayor es la intensidad de la corriente. Precisamente a costa de este trabajo aparece la corriente de inducción.

Es interesante señalar que en el caso de que el campo magnético de nuestro planeta fuese muy grande y en sumo grado heterogéneo, los movimientos rápidos de los cuerpos conductores en su superficie y en la atmósfera serían imposibles debido a la intensa interacción de la corriente inducida en el cuerpo con este campo. Los cuerpos se moverían como si fuese en un medio denso y viscoso, lo que se acompañaría, además, con un fuerte calentamiento. No podrían volar ni los aviones ni los cohetes. El hombre no podría mover con rapidez ni los brazos, ni las

piernas, ya que el cuerpo humano es un conductor bastante bueno.

Si el carrete en que se induce la corriente es inmóvil respecto al carrete vecino con corriente alterna, como, por ejemplo, se tiene en el transformador, entonces, también en este caso la dirección de la corriente de inducción se impone por la ley de conservación de la energía. Esta corriente siempre está dirigida de tal modo que el campo magnético creado por la misma procura disminuir las variaciones de la corriente en el devanado primario.

La naturaleza de la inducción electromagnética

Inmediatamente después del descubrimiento de la ley de la inducción electromagnética por Faraday, los científicos se afanaron por dar a ésta una estricta forma cuantitativa. En la actualidad, es difícil imaginarse aquellos esfuerzos penosos que se necesitaron para formular esta ley en el lenguaje de la concepción de la acción a distancia. En fin de cuentas se obtuvieron (por Neumann y Weber) fórmulas sumamente complejas y confusas por su contenido físico, pero a pesar de todo, capaces de describir cuantitativamente los hechos experimentales. En la actualidad estas fórmulas se pueden encontrar sólo en los libros sobre la historia de la física.

Fue Maxwell quien halló el verdadero sentido de la ley de la inducción electromagnética. Y Maxwell también dio a esta ley aquella sencilla y clara forma matemática basada en la idea del campo de la cual se vale, actualmente, todo el mundo.

Tratemos de figurarnos con la ayuda de qué tipo de razonamientos Maxwell supo averiguar en el fenómeno de la inducción electromagné-

tica una nueva propiedad fundamental del campo electromagnético.

Supongamos que tenemos ante nosotros un transformador ordinario. Al conectar a la red el devanado primario, obtendremos, inmediatamente, la corriente en el devanado secundario vecino, con la única condición de que éste está cerrado. Los electrones que se encuentran en el alambre del devanado se pondrán en movimiento.

Pero los electrones ignoran la ley de la inducción electromagnética. En pocas palabras, ¿qué fuerzas ponen en movimiento los electrones?

El propio campo magnético que atraviesa el carrete no puede hacerlo. Es que dicho campo actúa exclusivamente sobre las cargas en movimiento (en ello, precisamente, radica su diferencia respecto al campo eléctrico) y el conductor con los electrones que en éste se encuentran es inmóvil.

Desde luego, en la realidad el asunto no es tan simple. También en un conductor inmóvil los electrones realizan un movimiento caótico. Pero la velocidad media de este movimiento es igual a cero, por cuanto el número de electrones que se mueven en cualquier dirección dada es igual, en término medio, al número de electrones que se mueven en dirección opuesta. En correspondencia, la corriente originada inmediatamente por el campo magnético también debe ser igual a cero.

¿Qué es, entonces, lo que actúa?

Como sabemos, sobre las cargas, además del campo magnético, actúa también el campo eléctrico. Y este último, precisamente, puede también actuar sobre las cargas inmóviles. Ésta es su propiedad principal. Pero el campo de que hablamos (el campo eléctrico) se engendra directamente por las cargas eléctricas, mientras que

la corriente de inducción aparece por influjo del campo magnético alterno. ¿No es que aquí entran en juego otros campos físicos nuevos, si es que la idea de la acción próxima se considera inconmovible?

No nos apresuremos a sacar conclusiones, buscando la salvación —al primer impedimento que encontramos— en la invención de nuevos campos, como en su tiempo la salida de todas las dificultades la veían en la introducción de nuevas fuerzas, pues no tenemos ninguna garantía de que ya se conozcan todas las propiedades fundamentales de los campos eléctrico y magnético. En las leyes de Coulomb y Ampère que encierran la información básica sobre las propiedades del campo figuran campos continuos.

¿Y si en los campos alternos aparecen nuevas propiedades? Abriguemos la esperanza de que la idea sobre la unidad de los fenómenos eléctricos y magnéticos tan fructífera hasta la fecha, tampoco fallará en adelante.

En este caso queda la única posibilidad: suponer que los electrones se aceleran en el devanado secundario *por el campo eléctrico y que este campo se engendra por el campo magnético alterno directamente en el espacio vacío*. Con ello se afirma una nueva propiedad fundamental del campo magnético: *al variar en el tiempo, éste engendra en su alrededor el campo eléctrico.*

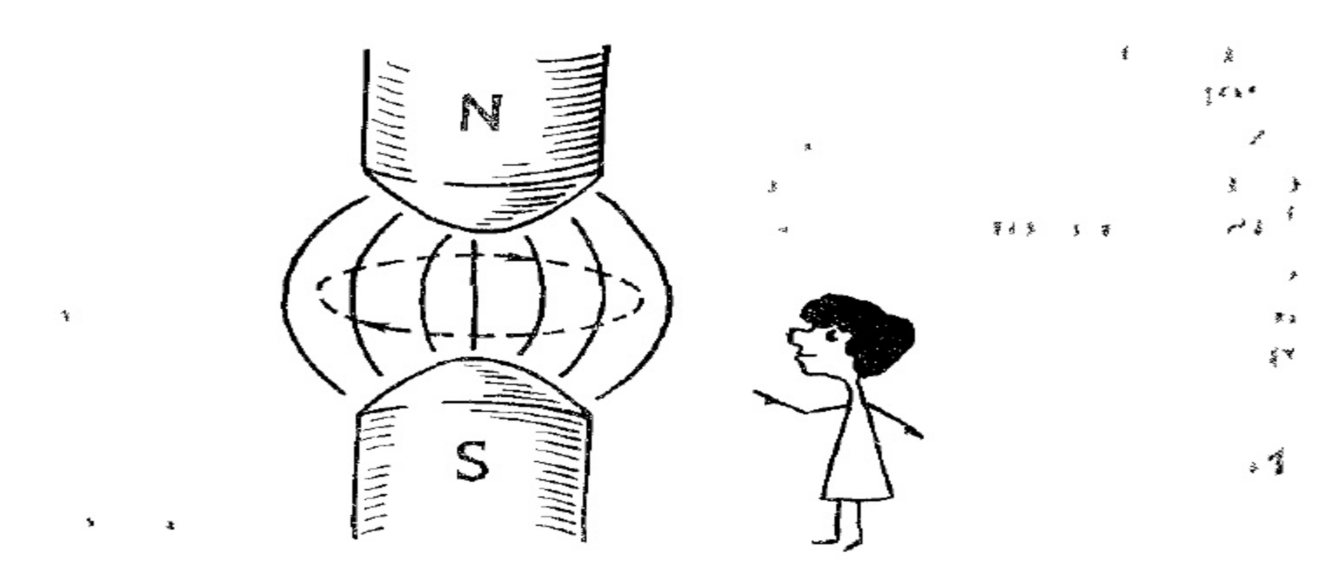
Ahora, el fenómeno de la inducción electromagnética se nos presenta bajo un aspecto completamente nuevo. Lo principal consiste en que es un proceso en el espacio vacío: el campo magnético engendra el campo eléctrico. Y el quid del asunto no cambia, sin importar que el circuito conductor (carrete) exista o no. El conductor con su reserva de electrones libres no es sino un indicador (registrador) del campo eléctrico naciente: éste pone en movimiento los

electrones en el conductor y, con ello, revela su presencia.

La esencia del fenómeno de la inducción electromagnética no radica, de nungún modo, en la aparición de la corriente de inducción, sino en el surgimiento del campo eléctrico.

Campo eléctrico rotacional

El campo eléctrico que se engendra durante la variación del campo magnético tiene una estructura completamente diferente en comparación con el electrostático. Dicho campo está vinculado directamente con las cargas eléctricas, y sus líneas de fuerza no pueden comenzar y terminar en éstas. Las mismas, en general, no comienzan y no terminan en ningún punto, representando unas líneas cerradas semejantes a las líneas de fuerza del campo magnético. Éste es el llamado campo rotacional.



Cuando varía el campo de un electroimán fuerte, aparecen los potentes torbellinos del campo eléctrico que pueden utilizarse para acelerar los electrones hasta velocidades próximas a la de la luz. Sobre este principio se basa la cons-

trucción del acelerador de electrones, betatrón. En este aparato la corriente eléctrica se engendra directamente en la cámara de vacío sin cualesquiera conductores metálicos.

Puede surgir la pregunta: ¿por qué, hablando con propiedad, este campo lleva el nombre de eléctrico? Es que tiene otro origen y otra configuración que el campo eléctrico estático. La respuesta es simple: el campo rotacional actúa sobre la carga de la misma forma que el electrostático, y nosotros hemos considerado y seguimos considerando esto como propiedad principal del campo.

Tenemos otra pregunta natural. Es que todo lo expuesto, en fin de cuentas, no es sino una suposición cuya certeza está lejos de ser evidente. ¿Puede ser que, en la realidad, las cosas van de otro modo? ¡No olviden que no percibimos el campo eléctrico como tal, juzgando acerca de su presencia tan sólo por las fuerzas que actúan sobre las partículas cargadas!

Pero lo anterior es, de hecho, la vieja duda acerca de la realidad de los campos, en general, expuesta por los adeptos de la acción a distancia. Su refutación categórica es la existencia de las electromagnéticas, en el propio proceso de cuya aparición el papel fundamental pertenece a la creación del campo eléctrico por el campo *magnético alterno*.

No todas preguntas tienen sentido

El campo magnético alterno engendra torbellinos del campo eléctrico. Que así sea. ¿Pero no le parece al lector que aquí es insuficiente la afirmación de por sí? Se quiere saber cuál es el *mecanismo* del proceso dado y si se puede explicar *cómo* esta ligazón de los campos se realiza en la naturaleza. Pero es precisamente aquí donde la

curiosidad natural del lector no se puede satisfacer. Aquí simplemente no hay mecanismo alguno. La ley de la inducción electromagnética es una ley fundamental de la naturaleza. Esto significa que es una ley básica, primaria. Por medio de su acción se puede explicar una gran cantidad de fenómenos, mas ella misma queda inexplicable, por la mera razón de que no se dan leyes más profundas de las cuales ésta derive en forma de corolario. En todo caso, por ahora ignoramos semejantes leyes. Tal es la suerte de todas las leyes fundamentales: la ley de la gravitación universal, la ley de Coulomb, la ley de Ampére, etc.

Por supuesto, es de nuestro libre albedrío plantear ante la naturaleza cualesquiera preguntas, pero no todas éstas tienen un sentido. Así, por ejemplo, pueden y deben investigarse las causas de diferentes fenómenos, pero es inútil tratar de averiguar por qué, en general, existe la causalidad. Tal es la naturaleza de las cosas, tal es el mundo en que vivimos.

Acerca de la simetría

En el fenómeno de la inducción electromagnética Maxwell advirtió la creación del campo eléctrico por el magnético. El siguiente paso, que ya fue el último en el descubrimiento de las propiedades fundamentales del campo electromagnético, Maxwell lo hizo sin cualesquiera sugerencias por parte del experimento.

No conocemos. exactamente, cuáles fueron los razonamientos por los cuales se dirigía el científico en este caso. Podían ser los mismos razonamientos que indujeron a los constructores del puente Anichkov en San Petersburgo a disponer las figuras de los caballos domados por ambos lados de la carretera, los mismos razonamientos

que no nos permiten abarrotar de muebles una parte de la habitación a cuesta de la otra. No es otra cosa que las consideraciones de la simetría, una simetría entendida no en el estrecho sentido geométrico. sino en uno más amplio.

Las propiedades de simetría son inmanentes a la naturaleza y, por lo visto, precisamente debido a ello percibimos la simetría como cierta armonía indispensable del mundo que nos rodea.

En los fenómenos electromagnéticos, claro está, no se trata de la belleza y la elegancia exteriores, las cuales pueden ser inherentes a aquello que observamos directamente, con la ayuda de los órganos de los sentidos. Aquí puede tratarse de la proporcionalidad y armonía intrínsecas, que la naturaleza revela al hombre ansioso de penetrar sus leyes prístinas. Al sentir esta armonía en la naturaleza, el hombre, lógicamente, anhela verla también allí donde los hechos, por ahora, todavía no la manifiestan con plena evidencia.

El campo magnético engendra el eléctrico. ¿Acaso en la naturaleza existe un proceso inverso cuando el campo eléctrico alterno engendra, a su vez, el campo magnético? Esta suposición sugerida por las razones de simetría constituye la base de la conocida hipótesis de Maxwell sobre las *corrientes de desplazamiento*.

Corriente de desplazamiento

Maxwell admitió que semejante proceso realmente tiene lugar en la naturaleza. Dio el nombre de corriente de desplazamiento al campo eléctrico alterno en el vacío o dentro del dieléctrico. Recibió el nombre de corriente porque *este campo engendra el campo magnético, de la misma manera que la corriente ordinaria*. (Aquí comienza y ter-

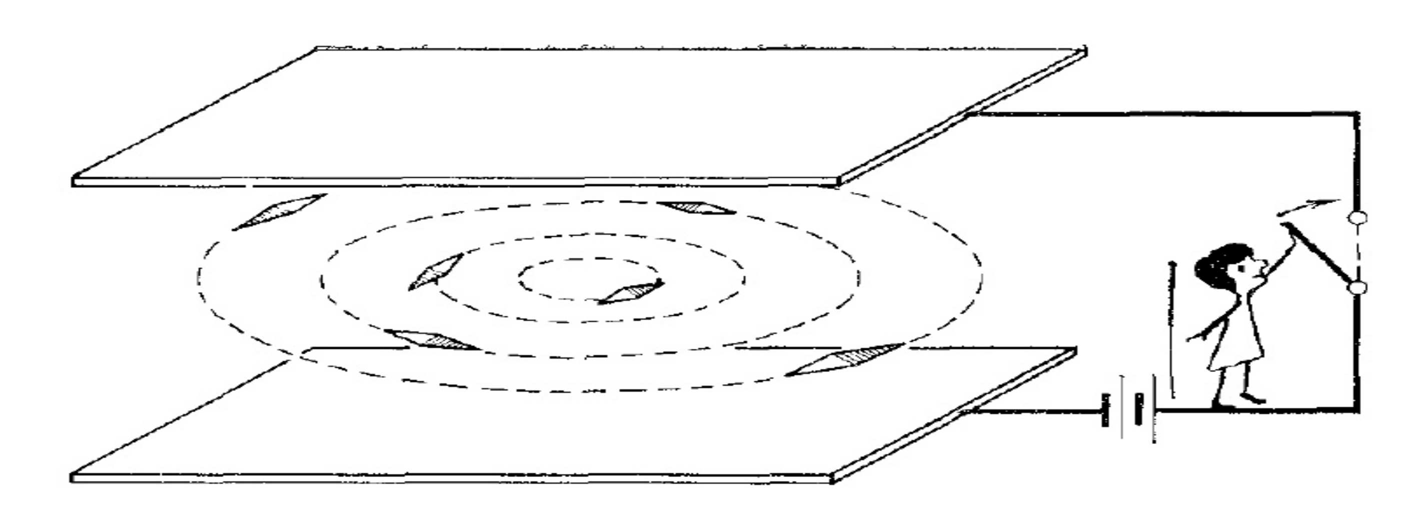
mina el parecido entre la corriente de desplazamiento y la de conducción.) La añadidura de la palabra "*desplazamiento*" nos dice, por una parte, que no se trata de una corriente ordinaria, sino de algo específico, y. por otra, nos hace recordar aquel tiempo lejano cuando con la variación del campo eléctrico en el vacío se vinculaba el desplazamiento de las partículas del hipotético éter.

La afirmación de Maxwell, durante un período largo, se quedó como una hipótesis, y nada más. Fue una hipótesis que, en la actualidad, con plena razón, podemos llamar genial: experimentalmente se ha demostrado su absoluta certeza.

Hoy en día puede parecer que en esta suposición no se encierra nada insólito, nada que asombre por la propia posibilidad de semejante conjetura. Pero, ¿acaso la podía enunciar cualquier hombre de ciencia? ¡No! No se debe olvidar que la propia posibilidad de esta hipótesis apareció tan sólo después de dar la explicación a la inducción electromagnética, basándose en las ideas sobre el campo. Y se trata de la época en que la mayoría de los científicos conocidos, en general, no daban importancia algo seria al propio concepto del campo, la época en que quedaron más de diez años hasta el momento de la demostración experimental de la existencia del campo.

Maxwell no sólo enunció la hipótesis, sino también, inmediatamente, formuló la exacta ley cuantitativa que determinaba la magnitud del campo magnético en función de la velocidad de variación del campo eléctrico.

Solamente nos queda admirar aquella extraordinaria consecuencia y tenacidad, aquella seguridad del carácter justo de sus ideas que manifestó Maxwell al formular las leyes del campo



electromagnético. Ya desde el principio mismo, cuando Maxwell, después de su exitosa labor en el ámbito de la teoría cinético-molecular de la sustancia, dedicó su atención al electromagnetismo, el científico, inmediatamente, decidió leer sólo los trabajos experimentales, excluyendo los teóricos, para que en su juicio sobre las leyes de estos fenómenos no se colase alguna idea preconcebida. Este modo de obrar resultó maravillosamente fructífero, ayudando a Maxwell a elaborar su propio e íntegro punto de vista en cuanto a los procesos electromagnéticos*. Audazmente, Maxwell puso por base de su teoría cuantitativa un objeto (campo) cuya existencia experimental todavía no fue demostrada. Y seguidamente, avanzando paso y apoyándose en las regularidades establecidas por vía experimental, llegó al objetivo final. La hipótesis sobre las

---

* Sin embargo, semejante procedimiento difícilmente puede recomendarse ahora para su uso común. En primer término, en aquella época tenía lugar el nacimiento de una ciencia completamente nueva, la electrodinámica, con sus particularidades específicas. Era el nacimiento de lo nuevo en el lugar donde antes no había sino vacío.

En segundo térmico, lamentablemente, no cada persona es Maxwell.

corrientes de desplazamiento era el último eslabón *con valor de principio*. Aquí, Maxwell atribuyó al objeto hipotético una nueva propiedad hipotética, sin tener en este caso, a diferencia de los anteriores, indicaciones experimentales directas.

Hablando en general, al proceder de esta manera es fácil pasar del campo de la ciencia al de la ficción, a menos que desde el principio mismo no se adivine la dirección correcta. Pero semejante cosa nunca se puede saber de antemano. Precisamente en la elección de la dirección, cundo se construye una teoría, se reflejan en primer lugar las capacidades de la persona genial.

Así, pues, se descubrió otra propiedad fundamental del campo electromagnético no propenso a descomponerse en más elementales. El campo eléctrico alterno engendra en el espacio vacío el campo magnético con líneas de fuerza cerradas (campo rotacional). Además, en el eléc*trico las líneas de fuerza del campo magnético* forman con el campo el tornillo dextrógiro,a diferencia del levógiro para el campo en el fenómeno de la inducción electromagnética. Más tarde aclararemos el profundo sentido de este enunciado.

La demostración de la realidad de la hipótesis de Maxwell es la existencia de las ondas electromagnéticas. La corriente de desplazamiento y la inducción electromagnética determinan por completo la propia posibilidad de su existencia.

Campo electromagnético

Después del descubrimiento de la interacción de los campos eléctrico y magnético se hace evidente un hecho importante: estos campos no representan algo aislado e independiente uno del

otro. *Son la manifestación de una integridad que puede llamarse campo electromagnético.*

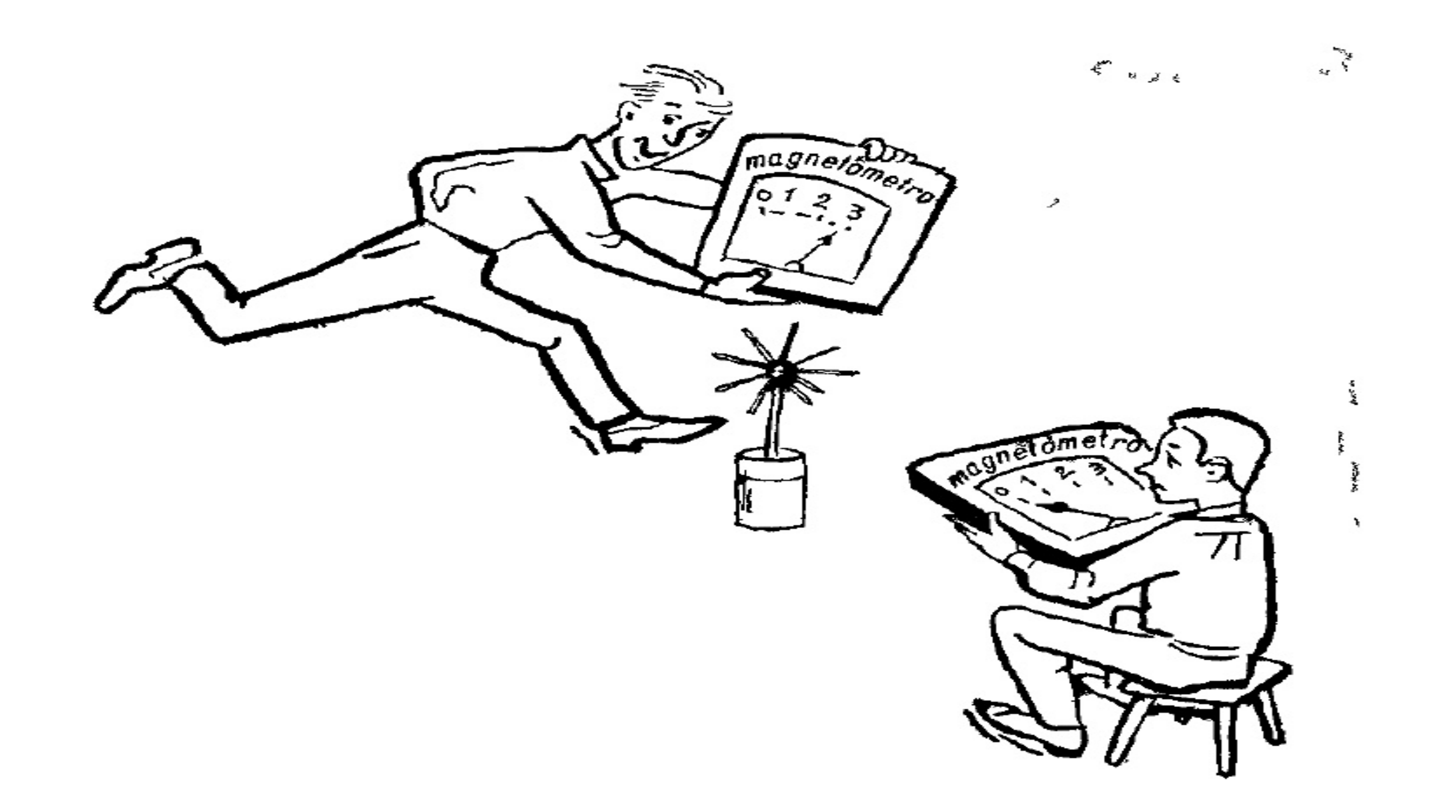
Supongamos que en cierta zona del espacio hay un campo eléctrico no homogéneo creado por alguna carga que está en reposo con respecto a la Tierra. Alrededor de la carga no hay campo magnético. Pero así será solamente respecto a la Tierra. (En el sistema de referencia relacionado con la Tierra, como se suele decir.) Para el observador que se mueve, el campo, no homogéneo que, sin embargo, no varía con el tiempo, ya se presentará como alterno. Y el campo eléctrico alterno engendra el magnético, y el observador, moviéndose, regsitrará el campo magnético a la par del eléctrico.

De la misma forma, el imán que se encuentra en la tierra crea tan sólo el campo magnético, pero el observador que se mueve respecto a éste descubrirá también el campo eléctrico, en plena correspondencia con el fenómeno de la inducción electromagnética.

Por lo tanto, la afirmación de que en el punto dado del espacio existe únicamente el campo eléctrico (o magnético) por sí sola carece de sentido. Es necesario añadir: respecto al sistema de referencia determinado. La ausencia del campo eléctrico en el sistema de referencia que contiene un imán en reposo no significa, de ningún modo, que en general no hay campo eléctrico. Dicho campo puede ser descubierto en relación con cualquier sistema que se mueve con respecto al imán.

La magnitud y la configuración de los campos, al pasar de un sistema de referencia al otro, varían análogamente a como cambia la coloración del paisaje que nos rodea si éste se examina a través de diferentes cristales coloreados.

A semejanza de como se tornan invisibles los objetos de color azul cuando se observan a través



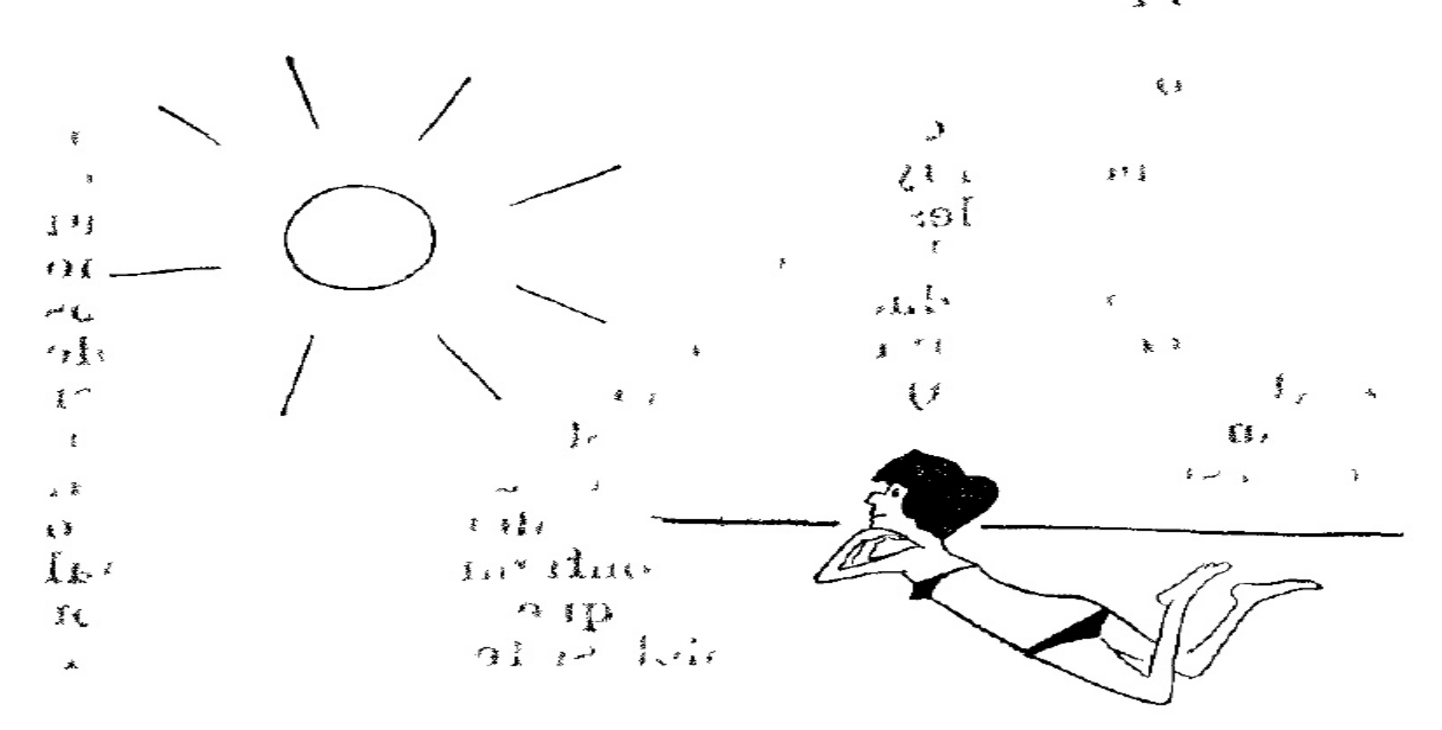
de un cristal rojo, en una serie de casos, mediante la elección adecuada del sistema de referencia, podemos convertir en no observable el campo magnético.

La diferencia consiste en una circunstancia, una sola, pero muy importante. Podemos renunciar a los cristales coloreados y decir: ¡he aquí los verdaderos colores del paisaje, he aquí cómo es éste en la realidad! Con pleno derecho podemos declarar como privilegiado uno de los filtros de luz (la atmósfera). Pero no se puede proceder de la misma manera con el sistema de referencia. Todos estos sistemas, en cuanto a su existencia, gozan de plena igualdad de derechos. Debido a ello, no se tiene una configuración especial cualquiera de los campos que presente valor absoluto, independiente del sistema de referencia.

8. Ondas electromagnéticas

Bacon acerca de las leyes de la naturaleza

Las leyes fundamentales de la naturaleza a las cuales pertenecen también las del electromagnetismo halladas por Maxwell son remarcables en el *siguiente* aspecto: "pueden dar más que está encerrado en el material del cual se han obtenido". Precisamente debido a esta causa es posible la ciencia. En efecto, si (parafraseando a Kozma Prutkov) cada ley, a semejanza de embutido, hubiera contenido solamente aquello con lo que lo rellenaron, habría tantas leyes cuantos fenómenos de la naturaleza se dan, y en lugar de la ciencia moderna habríamos tenido una aglomeración inmensa de datos sobre los procesos observados en la naturaleza, sin poder predecir, sin embargo, ninguna cosa nueva.



Este hecho concierne al propio sentido de la ciencia, y, debido a ello, el carácter indispensable

de éste se llegó a comprender todavía antes de que fueran formuladas las leyes de la mecánica. La frase citada anteriormente pertenece al filósofo inglés Bacon y fue enunciada con anterioridad a la salida a la luz del trabajo fundamental de Newton *Principios matemáticos de la filosofía de la naturaleza*.

Cómo se transmite la interacción electromagnética

Entre los innumerables corolarios que derivaban de las ecuaciones de Maxwell para el campo electromagnético figuraba un resultato de extraordinaria importancia que hubiera sido difícil adivinar de antemano. Como descubrió el propio Maxwell, llevaba implícito el *carácter finito de la velocidad de propagación de las interacciones electromagnéticas*.

De conformidad con la concepción de la acción a distancia, la fuerza de Coulomb variará inmediatamente si la carga vecina se desplaza de su lugar. La acción se transmite de modo instantáneo. Desde el punto de vista de la acción a distancia no puede suceder de otro modo. Es que una carga, directamente, a través del vacío, "siente" a la otra.

Según Maxwell todo se desarrolla de un modo completamente distinto y mucho más complicado. El desplazamiento de la carga modifica el campo eléctrico en su cercanía. Este campo eléctrico alterno (corriente de desplazamiento) engendra en las zonas vecinas del espacio el campo magnético alterno.

A su vez, el campo magnético alterno engendra el campo eléctrico alterno en correspondencia con la interpretación del fenómeno de la inducción electromagnética a base del campo, seguidamente el campo eléctrico, cuando llega su turno, crea

el campo magnético, etc. Además, los torbellinos del campo eléctrico (o magnético) que se producen extinguen el campo en los sectores donde éste ya estaba presente, pero, por el contrario, abarcan nuevas zonas del espacio. Todo transcurre de acuerdo con las reglas de determinación de la dirección de los campos sobre las cuales ya hemos hablado antes. Si los campos hubieran estado dirigidos de otro modo, esto habría conducido a la infracción de la ley de conservación de la energía. El campo magnético creado en el espacio habría aumentado con el tiempo extendiéndose, simultáneamente, por todos los lados.

De esta forma, el desplazamiento de la carga despierta a la vida las "capacidades" del campo electromagnético antes "adormiladas", y, como resultado, el impulso creciente de este campo, al extenderse, abarca cada vez mayores regiones del espacio circundante, haciendo reestructurarse por el camino aquel campo que existía antes de desplazarse la carga. Por fin, este impulso llegará a la segunda carga, lo que llevará, precisamente, a la variación de la fuerza que actúa sobre ésta. Pero este acontecimiento tendrá lugar no en aquel momento en que ocurrió el desplazamiento de la primera carga.

El proceso de propagación de la perturbación electromagnética cuyo mecanismo fue descubierto por Maxwell se desarrolla con una velocidad *finita*, aunque muy grande.

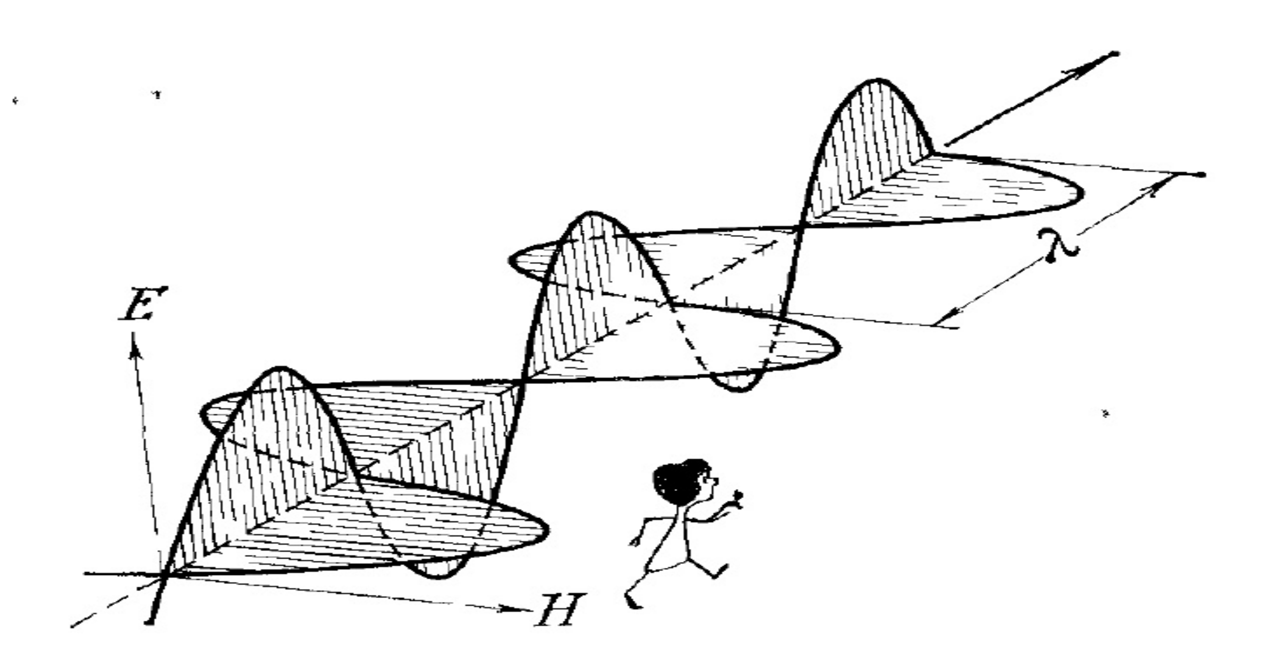
Cómo se origina la onda electromagnética

Teniendo en las manos tan sólo la pluma, y ante los ojos, el sistema de ecuaciones del campo magnético, Maxwell, de un modo puramente matemático, demostró que la velocidad de propagación de este proceso es igual a la de la luz en

el vacío: trescientos mil kilómetros por segundo. He aquí una nueva propiedad fundamental del campo que lo convierte, por fin, en una realidad tangible. Es posible realizar un experimento para medir el tiempo de propagación de la perturbación entre dos cargas. Por cierto, en la práctica, semejante experimento difícilmente se podrá realizar ya que la velocidad es muy grande. Pero esta circunstancia no es tan esencial. Lo importante es que por primera vez había aparecido la posibilidad de demostrar la existencia del campo por vía experimental. Y si esta posibilidad existe, entonces, tarde o temprano, siempre se hallará una variante tal del experimento que resultará realizable. Así, precisamente, sucedió en la realidad cuando Hertz logró obtener ondas electromagnéticas.

Figúrense que la carga eléctrica no simplemente se desplazó de un punto a otro, sino, además, es puesta a realizar oscilaciones rápidas a lo largo de cierta recta, de modo que se mueve como un peso suspendido de un muelle, pero mucho más rápidamente. En este caso, el campo eléctrico en la proximidad inmediata de la carga comenzará a modificarse periódicamente. Es evidente que el período de estas variaciones será igual al período de oscilación de la carga. El campo eléctrico engendrará el campo magnético que periódicamente se modificará, y este último, a su vez, provocará la aparición del campo eléctrico alterno ya a una distancia mayor de la carga, etc.

En el espacio, en torno a la carga, abarcando cada vez mayores regiones, se origina un sistema de campos eléctricos y magnéticos que varían periódicamente (por lo visto, muchos conocen la "instantánea" de este sistema) y este proceso se propaga a la velocidad de la luz. Se forma aquello que llamamos onda electromagnética que avanza



por todos los lados partiendo de la carga oscilante. En cada punto del espacio los campos eléctricos y magnéticos varían periódicamente en el tiempo, pero, ya que cuanto más lejos de la carga esté situado el punto tanto más tarde lo alcanzarán las oscilaciones de los campos, las oscilaciones no se producen sincrónicamente a diferentes distancias de la carga.

Maxwell estaba profundamente convencido de la realidad de las ondas electromagnéticas, pero no le estaba destinado vivir hasta el momento de su descubrimiento. Murió relativamente joven, diez años antes de que Hertz demostrara, por primera vez, experimentalmente la existencia de estas ondas.

Interacción por medio de las ondas electromagnéticas

Por medio de las ondas electromagnéticas se realiza un tipo completamente nuevo de interacción entre las cargas eléctricas Las ondas se emiten por las cargas eléctricas oscilantes, en consecuencia, por las cargas la velocidad de cuyo movimiento va-

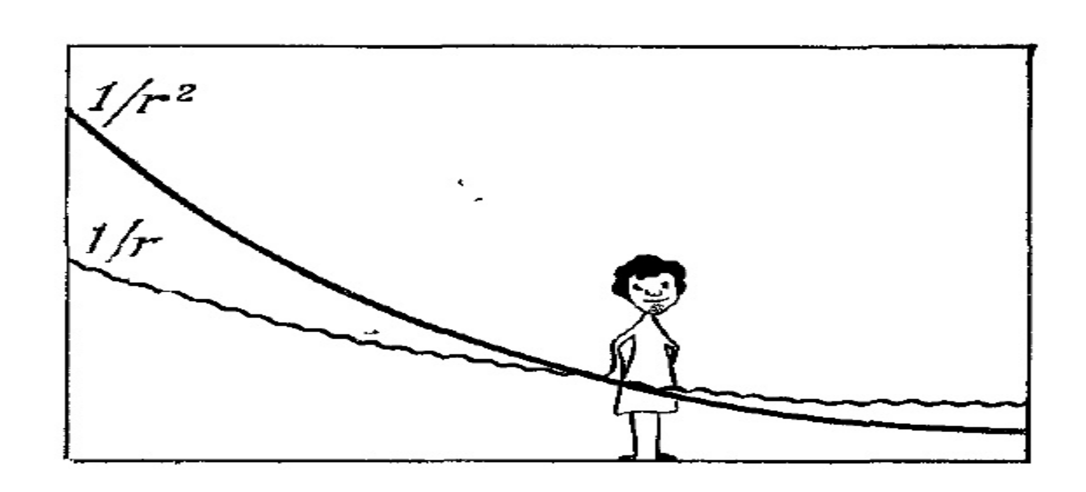
ría con el tiempo, — por las cargas que se mueven con *aceleración*. La *aceleración* es la principal condición de la creación de las ondas electromagnéticas. El campo electromagnético se irradia no sólo durante las oscilaciones de la carga, sino también durante cualquier cambio brusco de su velocidad.

Así, pues, ¡*las fuerzas de interacción realizadas por el campo electromagnético dependen no sólo de la distancia entre las partículas y sus velocidades, sino también de las aceleraciones!* Sin embargo, en este caso, de la aceleración depende únicamente la magnitud del campo. En cambio, la fuerza que actúa sobre la carga por parte del campo eléctrico de la onda electromagnética, como antes depende tan sólo de la intensidad del campo y la que actúa por parte del campo magnético, depende, además, de la velocidad del movimiento de la carga.

Con cuanta mayor frecuencia oscila la carga, mayor es su aceleración y, en correspondencia, tanto más intensas son las ondas que emite. Cuando la frecuencia de las oscilaciones aumenta sólo dos veces, la energía irradiada se acrecienta ¡16 veces! Ésta es la causa de que en las antenas de las estaciones de radio se excitan oscilaciones con la frecuencia de centenares de millones de oscilaciones por segundo.

El factor más importante de la interacción por medio de las ondas electromagnéticas que determina todo su valor es el carácter lento de la disminución de las intensidades de los campos en la onda en función de la distancia hacia la fuente. Como recordará el lector, las fuerzas electrostáticas y las de interacción de las corrientes son inversamente proporcionales al cuadrado de la distancia, considerándose, además de acción a distancia. Ahora bien, en la onda electromagnética, ¡el decrecimiento de los cam-

pos en función de la distancia transcurre inversamente proporcional a la *propia distancia!* Es un decrecimiento extremadamente lento. Todas las demás fuerzas disminuyen con la distancia de un modo mucho más rápido. En cambio, aquí, como lo demuestran los cálculos, a costa de la excitación consecutiva recíproca de los campos, éstos resultan capaces de apartarse muy lejos de la fuente. Ésta es la razón de que los campos de una estación de radio, incluso de potencia relativamente pequeña, pueden detectarse a distancias de miles de kilómetros, mientras que los campos estáticos a tales distancias ya no se revelan de ningún modo.



Aquí nos encontramos con un hecho interesante. El campo que la carga engendra a pequeña distancia de ésta es, principalmente, un campo culombiano (aunque algo modificado por el movimiento de la fuente) con adiciones relativamente pequeñas de los campos rotacionales eléctricos y magnéticos. Pero apenas nos alejamos a cierta distancia, estas adiciones se promueven al primer plano, eclipsando los campos culombianos que disminuyen rápidamente con la distancia.

Si se quiere, algo parecido sucede también con los hombres. ¿Acaso eran raros los casos cuando los contemporáneos quienes, por decirlo así, miraron desde una distancia corta, no comprendían, con excepciones contadas, a las personas, la verdadera escala de cuya grandeza devino clara tan sólo gracias a la perspectiva histórica? Kepler, Rembrandt en el último período de su creación, Lobachevski... ¿Acaso es posible enumerar a todos?

Pero retornemos a las ondas electromagnéticas.

¡Por la misma causa a que nos remitimos antes vemos (ya que la luz también es onda electromagnética) acumulaciones estelares alejadas de nosotros a distancias inconcebibles que la luz salva tan sólo durante miles de millones de años!

Tampoco podemos dejar de mencionar sobre un aspecto más del proceso de irradiación. Si la partícula irradia, entonces, las ondas electromagnéticas emitidas llevan consigo energía. La partícula emisora pierde energía y, por consiguiente, debe experimentar cierto frenado. Sobre ésta actúa algo semejante a la fuerza de rozamiento. ¿Pero qué representa esta fuerza? ¿Por parte de qué actúa?

Conocemos que sobre la partícula cargada actúa una fuerza por parte de los campos eléctrico y magnético. Hasta ahora teníamos en cuenta solamente los campos exteriores (es decir, creados por los cuerpos cargados que rodean la partícula). Pero, además, existen también campos propios engendrados por la partícula misma. ¿Ejercen estos campos alguna influencia sobre el manantial que los engendra? Es fácil comprender que, en el caso de que el manantial está en reposo, no hay fuerzas cualesquiera de autoacción, pues siendo de otro modo ocurriría una

cosa absolutamente inverosímil: la autoaceleración de la partícula dejada a su libre albedrío. La situación tampoco varía con el movimiento uniforme y rectilíneo del manantial (no es difícil convencernos de ello, al recordar que el reposo no es sino un caso particular del movimiento rectilíneo uniforme.) En estos casos simplísimos el bucle de campo se desplaza rápidamente junto con la partícula sin desprenderse ni deformarse.

El cuadro se hace completamente distinto si, por ejemplo, la fuente se empuja con brusquedad. Si la velocidad de propagación de las señales electromagnéticas hubiera sido infinitamente grande, entonces, tras la partícula que realizó el "arranque" se habría arrastrado todo el campo que ésta creó, y, por consiguiente, la fuerza de autoacción seguirá siendo nula, como antes. Pero semejante cosa no ocurre. La partícula tiene tiempo para salir precipitadamente de la posición de equilibrio en su propio campo, y como consecuencia de ello, debe aparecer una fuerza que trata de hacerla retornar a esta posición, o sea, la fuerza de frenado. La partícula parece atascarse en su propio campo. No en vano los físicos dicen que aparece el "rozamiento de radiación". No será un error decir que la energía perdida por la partícula que irradia es igual al trabajo de la fuerza del rozamiento de radiación, es decir, de la fuerza con la cual actúa sobre la fuente el campo que ésta engendra.

La autoacción tiene, además, otro rasgo interesante. Hemos señalado que la fuerza de autoacción de una partícula en reposo (o que se mueve uniforme y rectilíneamente) es igual a cero. Pero de aquí no se desprende, ni mucho menos, que también la energía es igual a cero. El bucle de campo tiene energía, así como tiene masa, por

lo tanto, éste hace su aportación a la inercia de la partícula.

Si el electrón, debido a cierta causa misteriosa, hubiera perdido de súbito su carga, en el mismo instante habría disminuido su masa. ¿En qué fracción? Precisamente esto no lo conocemos por ahora. Y esta circunstancia no es de extrañar. Es que en esta esfera abordamos tales aspectos de la interacción entre las partículas y el campo que éstas engendran los cuales se pueden llegar a comprender tan sólo después de una profundización fundamental de nuestros conocimientos acerca de aquello, que con frecuencia se denomina estructura de las partículas elementales. Y éste es por ahora el ámbito de la ciencia del día de mañana.

Lo manifiesto, por doquier,
¡lo eres tú!
Y lo oculto, por doquier,
¡lo eres tú!
Y todo lo que ve mi ojo, por doquier,
¡lo eres tú!

Djami, *Libro de la sabiduría*

CAPÍTULO IV

FUERZAS ELECTROMAGNÉTICAS EN ACCIÓN

1. ¿Cómo se manifiestan las fuerzas electromagnéticas?

Desde el libro en la mesa hasta la radioemisión de las galaxias

En este capítulo no se introducen ningunas fuerzas nuevas: se sigue contando acerca de las mismas interacciones electromagnéticas a las cuales está dedicado el capítulo anterior. Pero en aquel capítulo la atención se concentró en los problemas de principio concernientes a la propia naturaleza de las fuerzas electromagnéticas. En cambio, ahora trataremos de relatar cómo las "leyes fundamentales de ser" —que, en esencia, son poco numerosas— de los campos electromagnéticos permiten, de un modo único, llegar a comprender en el amplísimo círculo de fenómenos: desde los más cotidianos (¡por qué el libro no se hunde a través de la mesa!) hasta aquellos que con plena razón se denominan grandiosos (radioemisión de las galaxias).

Así, pues, continuamos el relato sobre las fuerzas electromagnéticas. Continuamos, pero al mismo tiempo comenzamos un relato nuevo.

Cómo se manifiestan las fuerzas electromagnéticas

Puede ser que el lector se acuerda de cómo en la pieza de Máximo Gorki *Los Bárbaros* contesta a la pregunta de Drobiazguin: "¿Y hay virtudes ocultas?", el cínico inveterado Tsyganov: "Al parecer, siempre son así... Yo no he visto virtudes manifiestas".

Con mucho mayor fundamento una respuesta de esta índole podría darse a la pregunta "¿Y hay en la naturaleza manifestaciones implícitas (latentes) de las fuerzas electromagnéticas?" Aquí, con la conciencia tranquila se puede afirmar: casi siempre tenemos que ver con las manifestaciones no evidentes de estas fuerzas, aunque, por cierto, cada uno de nosotros puede decir que se encontraba también con las manifestaciones patentes.

Las cargas positivas y negativas, más exactamente, las partículas cargadas positiva y negativamente, con raras excepciones resultan *ligadas* unas con otras formando cuerpos neutros. Aquí se debe tener presente que esta ligazón de ordinario se realiza en el seno más profundo de la materia, en los átomos. Solamente aquí la interacción directa con la ayuda de las fuerzas de Coulomb es decisiva. Sin embargo, esta interacción está escondida tan profundamente que sólo se puede descubrir valiéndose de complejos instrumentos físicos. En los demás casos, entre tanto, nos encontramos por excelencia con interacciones electromagnéticas entre sistemas neutros (átomos y moléculas). Es la interacción de cargas *ligadas* para la cual las fuerzas electromag-

néticas ya no intervienen de una forma tan simple como en las leyes de Coulomb y Ampère. Por este motivo, daremos a estas manifestaciones de las fuerzas electromagnéticas el nombre de implícitas no evidentes. Las partículas cargadas en estado *libre* se encuentran con mucha menor frecuencia que las en estado *ligado**. Las ocasiones en que en la naturaleza, a ojos vistas, por decirlo así, los cuerpos cargados actuasen así de acuerdo con Coulomb, y las corrientes, de acuerdo con Ampère son relativamente raras. No es casual, en fin de cuentas, que en el transcurso de muchos siglos, ya después de la aparición de la civilización, los hombres hubieran vivido rodeados por las fuerzas de naturaleza electromagnética, sin sospechar siquiera que la elasticidad, el rozamiento, etc., no son sino expresiones distintas de fuerzas idénticas en su base.

Cuando las fuerzas electromagnéticas llegan a ser de corto alcance

Las fuerzas electromagnéticas entre las cargas ligadas en sistemas neutros resultan ser *de corto alcance*. Estas fuerzas disminuyen con la distancia de un modo incomparablemente más rápido que las culombianas o newtonianas. Debido a ello, dichas fuerzas se hacen notables sólo a distancias muy pequeñas, como se suele decir, durante el contacto directo de los cuerpos. Aquí resulta encubierto el hecho de que, en la realidad, la interacción entre los cuerpos siempre se realiza a distancia por medio del campo

* A propósito, los términos cargas libres y ligadas son completamente "oficiales."

electromagnético, sin que, en esencia, exista contacto directo alguno.

Las interacciones evidentes descubiertas hace mucho tiempo, pero observadas tan sólo en condiciones especiales parecían un caso curioso que no guardaba relación estrecha con los fenómenos cotidianos. Con plena evidencia, estas fuerzas actuaban sin ningún contacto, a través del vacío.

Las partículas de carga opuesta forman de por sí estados ligados, dejando en este caso de ejercer influencia notable incluso sobre sus vecinos próximos. Tan sólo los vecinos más íntimos se ven honrados por su atención. Al mismo tiempo, las cargas en estos estados pierden la capacidad de desplazarse en el campo electromagnético in-



dependientemente unas de otras y no pueden engendrar la corriente eléctrica de conducción.

La justicia de los tiempos remotos conseguía efecto análogo al aherrojar a los criminales por parejas con una cadena. Una vez encadenados, ya no eran peligrosos para los circunstantes y no podían evadirse. Las cosas de esta índole eran comunes y corrientes:

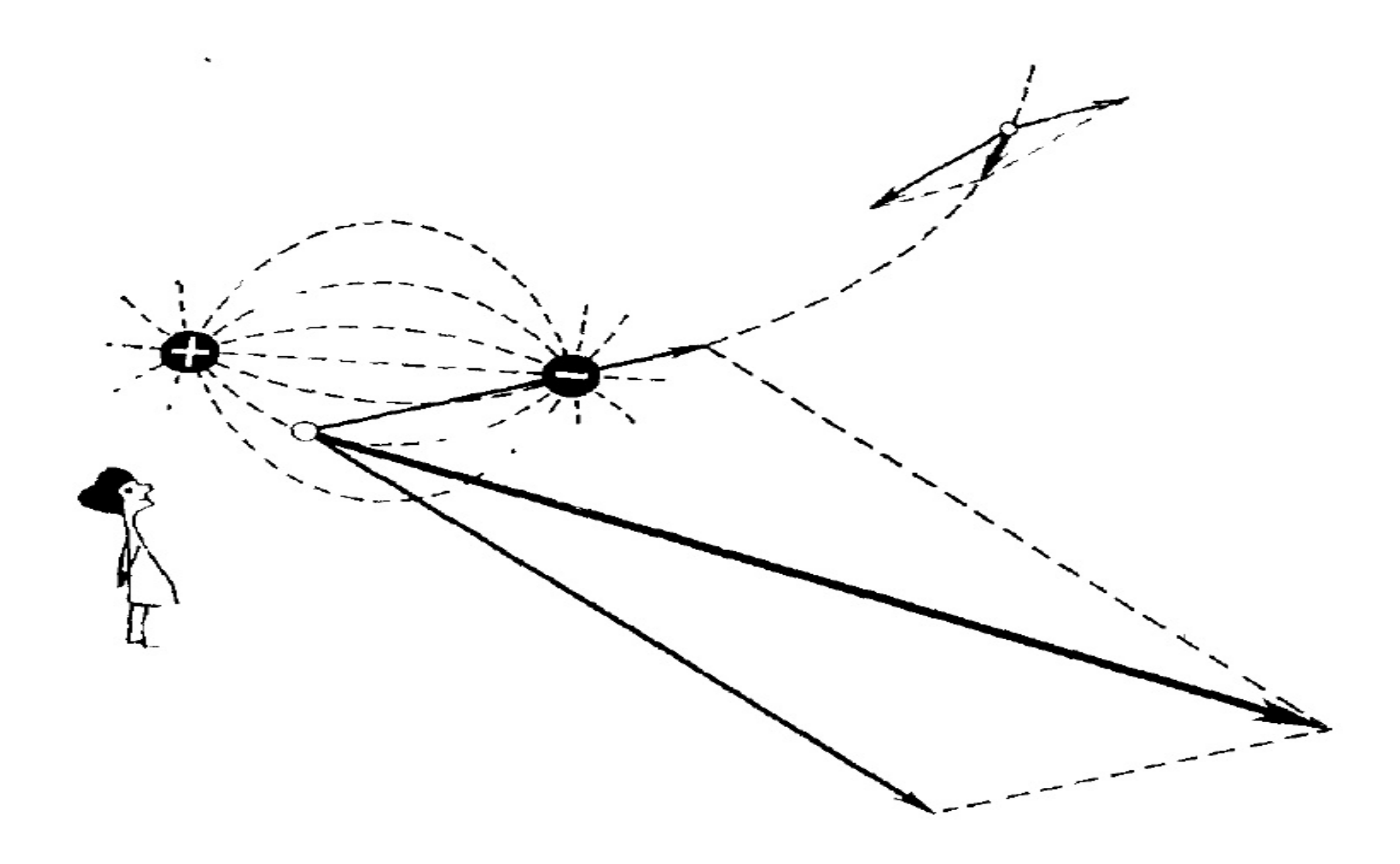
Nos agarraron, y el herrero
con hierros a los dos unió,

relata un bandido en el poema de Pushkin *Hermanos bandoleros*.

Y en el átomo sirve de tal cadena que ata los electrones al núcleo el campo electromagnético.

Nuestra comparación, por supuesto, no explica por qué los cuerpos neutros en estado ordinario no manifiestan interacciones electromagnéticas a distancias en cierto grado considerables. Aquí, el asunto, por sí solo, no es complicado. Se tiene, por ejemplo, un sistema neutro más simple que es el dipolo eléctrico: dos cargas iguales de signos opuestos a una distancia no grande una de la otra. En el punto alejado del dipolo a una distancia mucho mayor que la longitud del dipolo los campos eléctricos de la carga positiva y la negativa son casi iguales, pero están dirigidos en los sentidos por poco no opuestos. Por esta causa el campo total (la suma de los dos campos) es muy pequeño. Cuando se trata de un dipolo, el campo eléctrico disminuye inversamente proporcional al cubo de la distancia, y para los sistemas neutros más complicados el decrecimiento es todavía más rápido.

En otras palabras, casi todo el campo eléctrico está concentrado entre las cargas: las líneas de fuerza están tendidas de una carga a la otra



y parece como si tirasen de éstas, acercándolas. Se puede considerar que a una distancia grande del dipolo el campo eléctrico está ausente*. El campo en su totalidad resulta concentrado en el interior del cuerpo neutro y en su propia periferia.

No siempre está bien comenzar por lo simple

En nuestro relato acerca de la acción de las fuerzas electromagnéticas en la naturaleza casi todo el tiempo tendremos que ver con sus manifestaciones no evidentes. Los fenómenos tales como el relámpago, o la descarga del pez torpedo,

* Lo expuesto es válido para el dipolo estático cuyas cargas no se desplazan unas respecto a otras. Para la oscilación rápida de las cargas, el dipolo emitirá ondas electromagnéticas.

o los fuegos de San Telmo, etc., son interesantes y frecuentemente también temibles, pero todos ellos por su significación no tienen ni punto de comparación con tales fenómenos como la elasticidad, el rozamiento, etc.

Podríamos empezar el relato por los casos en que se trata de cargas eléctricas *libres* depositadas en los cuerpos o errando entre éstos. Sin embargo, la electricidad libre se crea de la ligada y no permanece en este estado en la naturaleza durante largo tiempo, si no nos referimos al estado de la sustancia a temperaturas muy altas*. Por esta razón, para explicar la aparición de un fenómeno tal como el relámpago, se debe partir de las cargas ligadas en los cuerpos neutros. Quiera o no, tendremos que comenzar por ello, aunque las manifestaciones implícitas de las fuerzas electromagnéticas son más complicadas que las evidentes. Al proceder de otro modo, sólo se logrará comprender cómo *se desarrollan* algunos procesos electromagnéticos simples, pero quedará sin esclarecer cómo y por qué éstos se engendran y por qué no se prolongan por un lapso infinito.

Puede ser que no valía la pena hablar tan detalladamente sobre todas estas cosas, si no hubiera sido por una circunstancia. En la electrotécnica, que es la que forma, principalmente, las ideas del hombre moderno acerca de las fuerzas electromagnéticas, se utilizan, en la mayoría de los casos, las cargas libres, con la particularidad de que son cargas en movimiento, o sea, corriente eléctrica. Hasta la fecha, el hombre no consiguió "domesticar" las fuerzas electro-

---

* A temperaturas muy altas la sustancia pasa al estado de plasma, el cual los científicos, con plena razón, denominan cuarto estado de la sustancia, a la par de sólido, líquido y gaseoso.

státicas, aunque éstas son incomparablemente más potentes que las magnéticas. Debido a ello, con frecuencia, se crean, involuntariamente, nociones erróneas acerca de la significación de las fuerzas de distinto tipo en el mundo que nos rodea. La naturaleza es mucho más ahorrativa en el aprovechamiento de las fuerzas electromagnéticas, pues casi en todos los casos dio "preferencia" a las eléctricas (culombianas) por ser éstas más potentes, reduciendo al mínimo el papel perteneciente en la Tierra a las fuerzas magnéticas. Se puede decir que la naturaleza se mostró como un "ingeniero" más ingenioso que los hombres. Aquí, precisamente, procuraremos contar sobre su proceder en esta cuestión. Trataremos de no tocar las aplicaciones técnicas de las leyes de la electrodinámica: nuestra tarea es relatar, en primer lugar, sobre las *fuerzas en la naturaleza*.

2. Las fuerzas, la estructura de la materia y las ecuaciones del movimiento

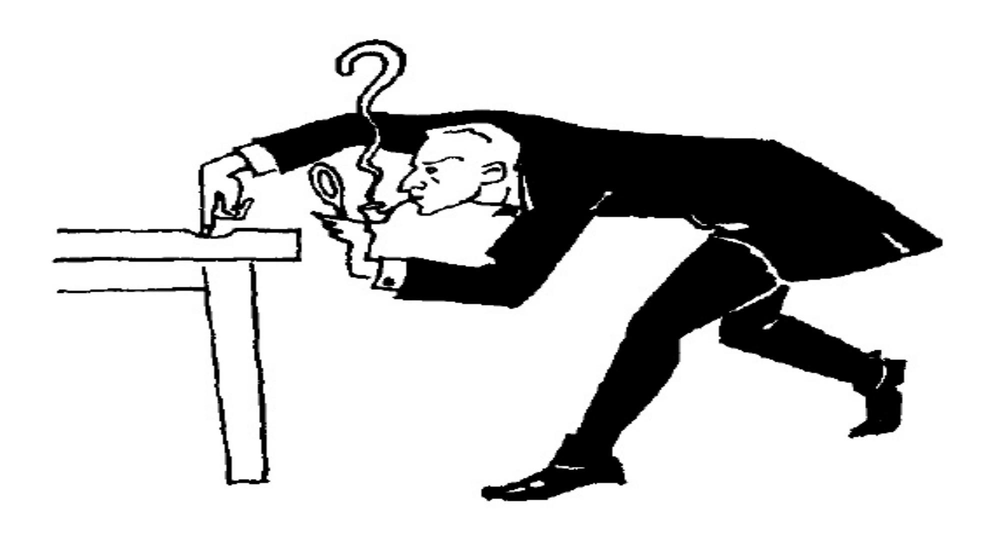
Qué se debe saber para explicar la elasticidad

Retornemos a nuestra mesa abandonada en la pág. 129. ¿Cómo se puede explicar, en fin de cuentas, por qué durante el pandeo de la mesa aparece una fuerza que procura hacerla regresar al estado inicial? Ya hemos expuesto con anterioridad que esta fuerza posee naturaleza electromagnética*. Ahora conocemos las leyes principales del electromagnetismo y, como puede parecer, ya estamos preparados a dar, en el acto,

* Más tarde veremos que este fenómeno tiene naturaleza cuántica.

la explicación del origen de la fuerza elástica.

Pero ¡hagan un intento de hacerlo! Se sobreentiende que no inventarán ninguna razonable teoría de las fuerzas de elasticidad. Es *insuficiente* conocer únicamente la naturaleza de las fuerzas electromagnéticas. "Y es peligroso teorizar sin disponer de datos. De modo inadvertido para sí mismo el hombre comienza a trocar los hechos para ajustarlos a su teoría, en vez de fundamentar la teoría por los hechos". Estas palabras pertenecen al "genio de Baker Street", al señor Sherlock Holmes. Y son justas, en igual medida, tanto en la investigación de los crímenes, como en la investigación de la naturaleza.



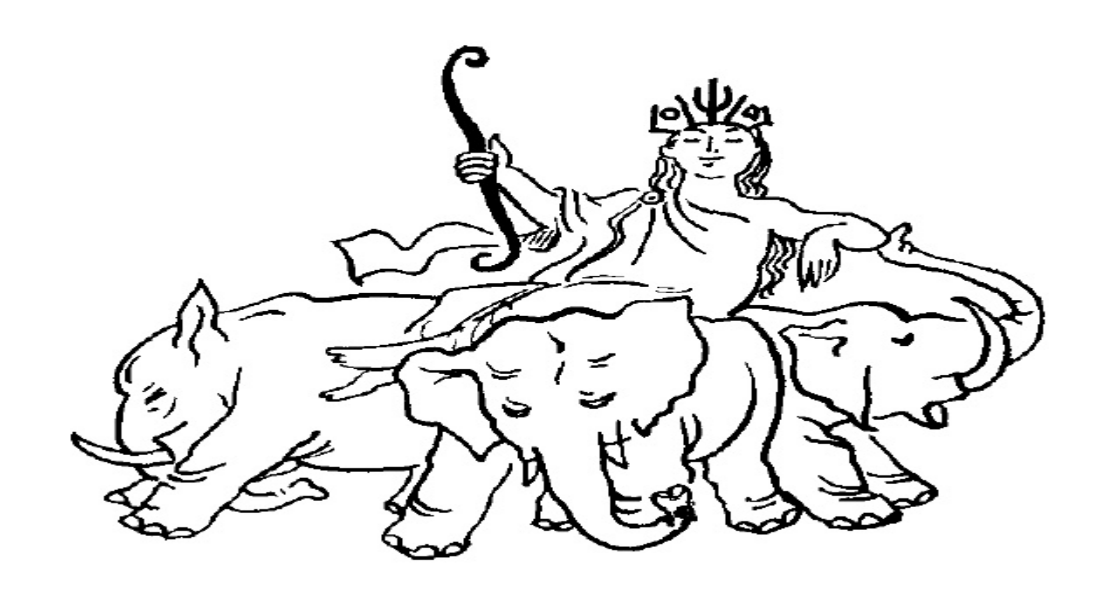
¿Qué más necesitamos saber para formar para sí un cuadro claro de aparición de las fuerzas elásticas?

Las leyes de las interacciones electromagnéticas nos permiten decir qué fuerzas se engendran entre las partículas *cargadas* a una distancia *determinada* entre éstas, si se mueven con *velocidades* conocidas. Para hallar el valor de estas fuerzas es preciso, por consiguiente, además de las interacciones, conocer también cuáles

son las *propiedades de las partículas* que integran la sustancia, cómo están *dispuestas* unas respecto a otras y cómo *se mueven*. Sin reunir todos estos conocimientos no estaremos en condiciones de explicar ni el origen de las fuerzas de elasticidad, ni el de las de rozamiento, ni de cualesquiera otras fuerzas de naturaleza electromagnética. Tampoco podremos comprender por qué los cuerpos sólidos tratan de conservar su forma, y los líquidos, su volumen.

Tres elefantes en los cuales descansa la física

Aquí no hay nada inesperado. Las propiedades elásticas de la goma, por ejemplo, recuerdan muy poco las de una varilla de madera, a pesar de que tanto en el primero, como en el segundo caso la elasticidad tiene naturaleza electromagnética. Únicamente por la diferencia en la estructura de la sustancia podemos explicar este hecho, así como otros semejantes. Ya hablamos un poco sobre la estructura de la sustancia cuando abordamos el problema de las manifestaciones evidentes y no evidentes de las fuerzas electro-



magnéticas. A continuación, trataremos este tema con mucha mayor amplitud.

Supongamos que tenemos noción sobre la estructura de la materia. ¿Es esto suficiente para explicar las fuerzas elásticas, así como otras de origen electromagnético? ¿Permite esto llegar a comprender la estabilidad de los pedazos de la sustancia? Durante la compresión o la dilatación varían las dimensiones de los cuerpos y, por consiguiente, también las distancias entre las partículas cargadas que integran la sustancia. Tiene lugar el cambio de estado del movimiento de las partículas, varían sus velocidades y éstas se desplazan. Para averiguar cómo se desplazará la partícula por acción de una fuerza determinada —lo que es necesario en la teoría de la elasticidad— hay que conocer, además, las *leyes del movimiento*: es preciso saber cómo varía el movimiento por impacto de una fuerza. Para explicar la estabilidad de los trozos de la sustancia también es necesario el conocimiento de las ecuaciones del movimiento por cuanto la sustancia está estructurada a partir de partículas que están en movimiento y en interacción, y solamente debido a este movimiento resulta posible la estabilidad tanto del propio átomo, como de las formaciones a partir de un número enorme de átomos, o sea, de los cuerpos macroscópicos.

Ya conocemos las ecuaciones clásicas del movimiento. Se trata de las leyes de Newton de las que hablamos con anterioridad. Precisamente las ecuaciones del movimiento, junto con la ley de la gravitación universal dieron la posibilidad de explicar el movimiento de los planetas del sistema solar, y ya en el último período permiten calcular, con altísima precisión, las trayectorias de las naves cósmicas. En este caso es absolu-

tamente insuficiente el conocimiento sólo de las fuerzas gravitacionales.

De este modo resulta que junto con las *leyes fundamentales de las interacciones* se deben saber también la *estructura de la sustancia* y las *ecuaciones del movimiento*. A propósito, este conocimiento es indispensable para la *explicación de cualquier fenómeno físico*. La estructura de la sustancia, las fuerzas y las ecuaciones del movimiento: he aquí los tres "elefantes" sobre los cuales descansa toda la física.

Estructura de la sustancia

Ya hemos puesto en claro lo que son las fuerzas y las ecuaciones del movimiento. En cuanto a las ideas acerca de la estructura de la sustancia, éstas, en primer término, incluyen el conocimiento de las propiedades de las partículas elementales. También los datos acerca de las principales combinaciones estables que forman estas partículas (núcleos atómicos y átomos) pueden referirse a la estructura de la sustancia. Por fin, el conocimiento de la estructura de la sustancia incluye el saber sobre las formaciones ordenadas a partir de los átomos, o sea, sobre las moléculas y los cristales. Este último es necesario, precisamente para explicar las fuerzas de elasticidad.

"Es imposible abarcar lo inabarcable"

El lector ya se habrá fijado en qué difícil situación fuimos a parar: teníamos el propósito de relatar tan sólo sobre las fuerzas, pero se puso de manifiesto que debemos hablar, además, sobre la estructura de la sustancia, así como sobre las ecuaciones del movimiento. ¡Y así resulta, pues, que se trata de la física en su totalidad!

Las dificultades no saltaban a la vista cuando hablamos acerca de las acciones de las fuerzas gravitacionales. Estas fuerzas son considerables tan sólo para cuerpos grandes cuya estructura interna no repercute, en modo alguno, en el valor de la fuerza (sólo su masa es sustancial). Las leyes del movimiento son simples y evidentes, son las ecuaciones de Newton.

Las cosas son mucho más complicadas cuando se trata de las fuerzas electromagnéticas dentro de los cuerpos neutros. Aquí se necesitan datos acerca de las propiedades de las partículas elementales, así como acerca de la estructura de los átomos, de las moléculas y de los cristales. Y lo primordial radica en que los movimientos de las partículas atómicas, la interacción entre las cuales, en fin de cuentas, condiciona la estabilidad y las propiedades elásticas de la sustancia, están sujetos a unas leyes del movimiento inconmensurablemente más complejas que las clásicas. Son las leyes de la mecánica cuántica, y la narración sobre ésta requiere de por sí un libro aparte.

Nosotros seguiremos estrictamente nuestra finalidad que consiste en relatar sobre las *fuerzas* en la naturaleza, y por esta causa nuestro afán será limitarnos a un mínimo de información proveniente de otras ramas de la física sin la cual es absolutamente imposible pasar. En el cuadro que presentaremos sólo se dará un esquema simplificado del comportamiento de las partículas, y la verdadera comprensión de este comportamiento únicamente es posible a condición de un conocimiento más o menos profundo de la mecánica cuántica. Y de seguir otro camino, podemos encontrarnos, con facilidad, en la situación de la persona que se propone a entretener a los oyentes contándoles un episodio de su vida

y que en vez de ello comienza a exponer detalladamente toda su biografía, por temor que no la comprendan como es debido.

Unidad de la naturaleza

Cabe señalar que los elefantes sobre los cuales descansa toda la física no son, ni mucho menos, seres completamente independientes. Las particularidades de cada uno de éstos prederminan, en una u otra medida, el carácter de los demás. Tan sólo en la teoría de las partículas elementales todavía no hemos descubierto un vínculo orgánico entre las propiedades de estas partículas, las fuerzas y las ecuaciones del movimiento. No está claro todavía por qué en el mundo existe una cantidad determinada de partículas elementales y por qué éstas poseen precisamente aquellas propiedades que se descubren en el experimento. En este sentido el problema de la estructura de las partículas elementales no está resuelto. Sin embargo, ya hoy en día se tiene cierta esperanza de resolverlo, aunque sea parcialmente, en un futuro próximo. Comienzan a perfilarse los vínculos a los cuales nos hemos referido, y se hace cada vez más sólida la seguridad de que solamente los defectos de nuestra "visión científica" crean la ilusión de tres pilares independientes de la teoría. A lo mejor, todo el edificio de la ciencia debe descansar, por decirlo así, en una sola tortuga. Y aquello que consideramos como "elefantes independientes" no es sino segmentos *sui géneris* de la concha de esta tortuga por ahora ignota.

Las estructuras de los átomos, de las moléculas y de los pedazos macroscópicos de sustancia se determinan plenamente por las conocidas fuerzas de interacción de las partículas que integran estos objetos y por las leyes de su movimiento.

Por supuesto, se debe saber, además, qué partículas, precisamente, componen los átomos y la sustancia, y aquí los datos necesarios los puede proporcionar tan sólo la experiencia. Seguidamente, de principio, la estructura del átomo, de la molécula, etc., puede obtenerse "en la punta de la pluma". Por cierto que en muchos casos sólo de principio. Las dificultades que surgen son tan enormes, en particular, cuando el sistema consta de un gran número de partículas, que los datos principales se deben obtener por vía experimental.

Por regla general, los investigadores penetran en los secretos de la estructura de las sustancias por medio de experimentos directos antes que obtienen la posibilidad de investigarla basándose únicamente en las leyes fundamentales de las interacciones y en las ecuaciones del movimiento.

Con frecuencia, se consigue formular estas últimas cuando se plantea el problema de explicar los hechos conocidos acerca de la estructura de la sustancia. Por ejemplo, actualmente conocemos de qué se componen los núcleos atómicos de todos los elementos, pero no tenemos una teoría consumada de las fuerzas nucleares y, como consecuencia, no podemos predecir teóricamente y con plena certidumbre hasta qué punto es estable una u otra combinación de protones y neutrones.

El más simple camino

Es completamente comprensible que resulta mucho más sencillo *explicar* por medio de las fuerzas y las leyes del movimiento conocidas los *hechos*, *establecidos* de modo experimental, *referentes a la estructura de la sustancia* que hacer el intento de *hallar*, valiéndose de estas

leyes, cómo *debe estar* estructurada la sustancia. De la misma manera es mucho más fácil llegar a entender la estructura de un automóvil ya construido y formar la idea de cómo y por qué éste funciona que diseñarlo de nuevo, disponiendo tan sólo de un juego de materiales y de la ciencia ingenieril. No en vano existe la legislación sobre las patentes de invención que protege los derechos de los inventores. Es verdad que aquí tenemos que ver con una diferencia esencial. El juego de materiales de que dispone el diseñador es heterogéneo. También pueden ser muy variados los requisitos técnicos para los automóviles. En la naturaleza las cosas toman otro cariz. Los átomos y las moléculas se construyen de un juego completamente estandarizado de "piezas": los núcleos, a partir de protones y neutrones, y las envolturas, a partir de electrones. Además, las leyes de la naturaleza (las de la mecánica cuántica) determinan de un modo absolutamente unívoco el "rendimiento de artículos acabados", o sea, el conjunto de átomos posibles en la naturaleza y de moléculas no demasiado complejas. Estamos privados de la posibilidad de variar las propiedades de los átomos, como esto se hace con los tipos de los automóviles. Lo único que se puede hacer es obtener moléculas complejas y sustancias de propiedades determinadas (por ejemplo, polímeros) al combinar los materiales de partida y desarrollar la tecnología de su elaboración.

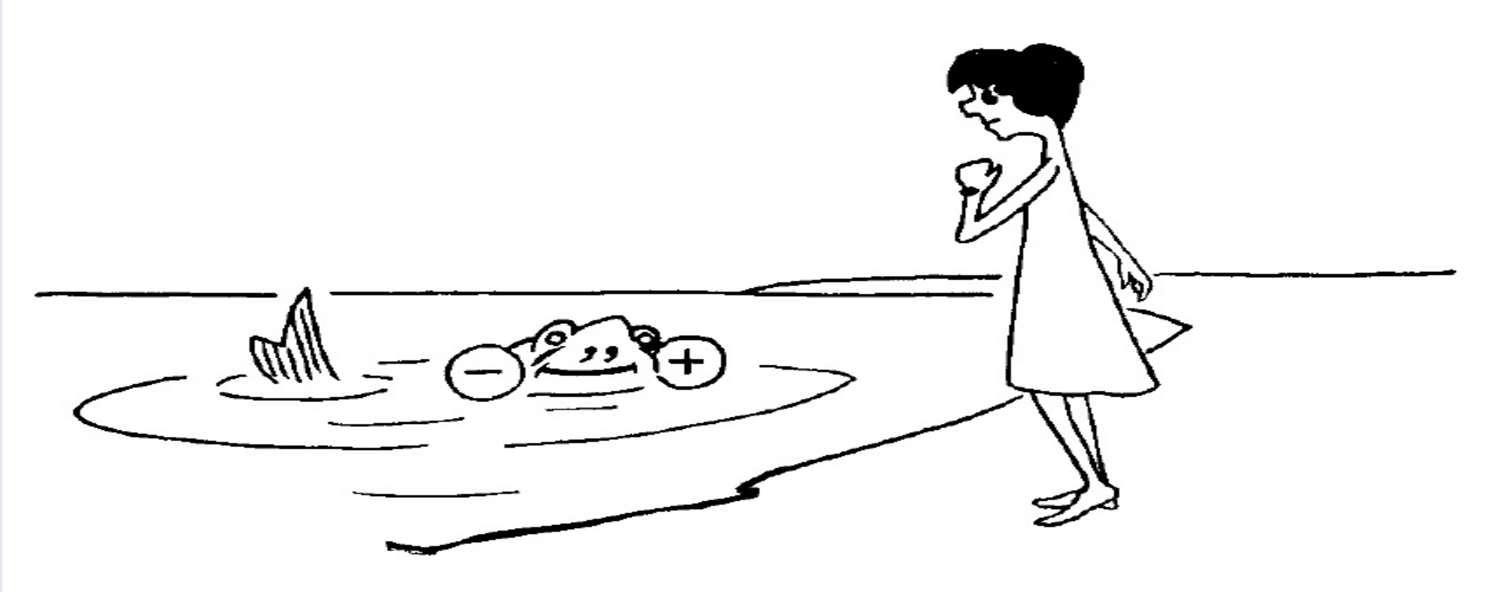
A continuación, seguiremos la ruta más simple. Consideraremos establecidos experimentalmente los datos principales acerca de la estructura de los átomos, las moléculas y los cuerpos macroscópicos, sin mencionar, aunque sea en una palabra, cómo se ha logrado esto. Nuestro objetivo primordial es relatar cómo, por la acción

de las fuerzas electromagnéticas, puede explicarse esta estructura. Después se podrá pasar a exponer qué sucede con la sustancia durante las acciones desde fuera. ¿Qué fuerzas aparecen en ésta y por qué razón?

3. Fuerzas electromagnéticas en los cuerpos eléctricamente neutros

El átomo

"Denme una reserva de electrones y yo, inmediatamente, valiéndome de las fuerzas culombianas, les construiré un átomo". Así podría decir, con pleno derecho, el núcleo atómico... si éste supiera hablar. Es que precisamente estas fuerzas retienen los electrones junto al núcleo cargado positivamente. Si "desnudamos" el núcleo, arrancando los electrones que lo cubren, el campo eléctrico de éste, en el acto, comenzará a captar los electrones libres que pasan volando a su lado, y seguirá capturándolos hasta que el número de electrones se haga igual a la carga del núcleo. Apenas el sistema electrones —núcleo se convierte en neutro, la estructuración del átomo finaliza.



En la actualidad, los fundamentos de la estructura atómica llegaron a convertirse en una verdad consabida. En el centro del átomo está dispuesto el núcleo en que se concentra casi toda la masa del mismo, y en torno al núcleo se mueven los electrones.

El átomo es pequeño y casi vacío en su interior, si no tomamos en consideración el campo eléctrico que lo llena. El átomo es mucho más vacío que nuestro sistema solar cuyas dimensiones superan centenares de veces las del propio Sol y decenas de miles de veces las de los planetas. Si el átomo, súbitamente, creciera hasta el tamaño de la órbita terrestre el núcleo resultaría ser mil veces menor que el Sol. Y téngase en cuenta que, de disminuir mil veces nuestro Sol, en lugar del disco brillante veríamos en el cielo un punto luminoso y nada más.

Con frecuencia, incluso hoy en día se dice —y antes se tenía plena seguridad de ello— que los electrones se mueven alrededor del núcleo por unas órbitas determinadas, similares a los planetas del sistema solar, pues las fuerzas electrostáticas por su carácter son del todo análogas a las fuerzas de la gravitación universal. La diferencia consiste sólo en que la fuerza de interacción de los "planetas" del sistema atómico (los electrones) unos con otros no se diferencia en un grado considerable de la de su interacción con el núcleo, mientras que en el sistema solar solamente la atracción hacia el Sol es grande. La acción recíproca de los planetas introduce pequeñas correcciones. La carga del núcleo más pesado no supera más que 100 veces la del electrón. En cambio, la masa del Sol es millón de veces mayor que la de los planetas. Finalmente, los electrones se repelen, mientras los planetas se atraen.

Pero no es aquí donde radica la colosal di-

ferencia existente entre la estructura del átomo y la del sistema solar.

El enigma del origen del sistema solar que todavía queda no descubierto hasta el final, guarda en su seno las causas de las dimensiones determinadas de las órbitas de los planetas de este sistema. Con facilidad podemos admitir que habrían podido ser otras. ¡Pero para qué hablar! Es que ahora los hombres, ellos mismos, crean pequeños planetas y podemos elegir arbitrariamente sus órbitas, dando al cohete una velocidad determinada.

En el átomo todo es completamente distinto. Sus propiedades y, por consiguiente, la estructura, no dependen en absoluto del origen. Todos los átomos del elemento químico dado son idénticos independientemente del hecho de si existen desde tiempos inmemoriales o han nacido literalmente ante nuestros ojos por captura de electrones con el núcleo recién "fabricado". Es imposible obligar al electrón en el átomo a moverse a nuestro antojo.

El quid de la cuestión reside en que el núcleo, cuando construye el átomo por medio de su campo eléctrico, *no se atiene a las reglas de la mecánica de Newton, ni tampoco a las reglas de la electrodinámica de Maxwell.* Es imposible, en general, construir un átomo que viva dirigiéndose por estas leyes.

Por supuesto, los electrones en el átomo no pueden moverse siguiendo una recta. Éstos se mueven con aceleración y, por lo tanto, deben emitir ondas electromagnéticas. La emisión viene acompañada de pérdida de energía y, debido a ello, los electrones inevitablemente tienen que caer sobre el núcleo, a semejanza de como el satélite que se encuentra en las capas superiores de la atmósfera, al perder energía por resistencia del aire, tarde o temprano cae sobre la

Tierra. La diferencia consiste en que el satélite puede girar durante años, mientras que el electrón, si se sigue la teoría clásica, puede hacerlo no más que durante una cienmillonésima de segundo. Una fulguración efímera de luz sería testimonio de la destrucción del átomo. El campo electromagnético de la física clásica debería aniquilar el átomo, aunque este mismo lo engendra. Sucede absolutamente como en la novela de Gógol *Tarás Bulba*, cuando Tarás dice a su hijo: "Yo te he dado la vida y seré yo quien te mataré".

Pero, en realidad, no ocurre nada semejante. Si no se trata al átomo de un modo demasiado rudo, éste puede existir tan largamente como se quiera. El proceder de la naturaleza, al someter el movimiento de las micropartículas a las leyes cuánticas fue muy sabio. Cumpliendo las reglas cuánticas de comportamiento el átomo evita su pereción, análogamente a como los conductores de los automóviles que observan las reglas del tráfico previenen los accidentes. Sólo se debe tener en cuenta, en este caso, que las reglas cuánticas del "tráfico" intraatómico es una ley de la naturaleza que no puede ser infringida ni por el electrón, ni por cualquier otra cosa en el mundo. La esencia de estas reglas consiste en que la energía del electrón en el átomo puede tener tan sólo una serie determinada de valores discontinuos (discretos), no puede variar paulatinamente y que el electrón no está en condiciones de irradiar ininterrumpidamente. En todos los casos, se da un valor mínimo de energía que el átomo no pierde, cualesquiera que sean las condiciones, siempre que consiga conservar su envoltura electrónica.

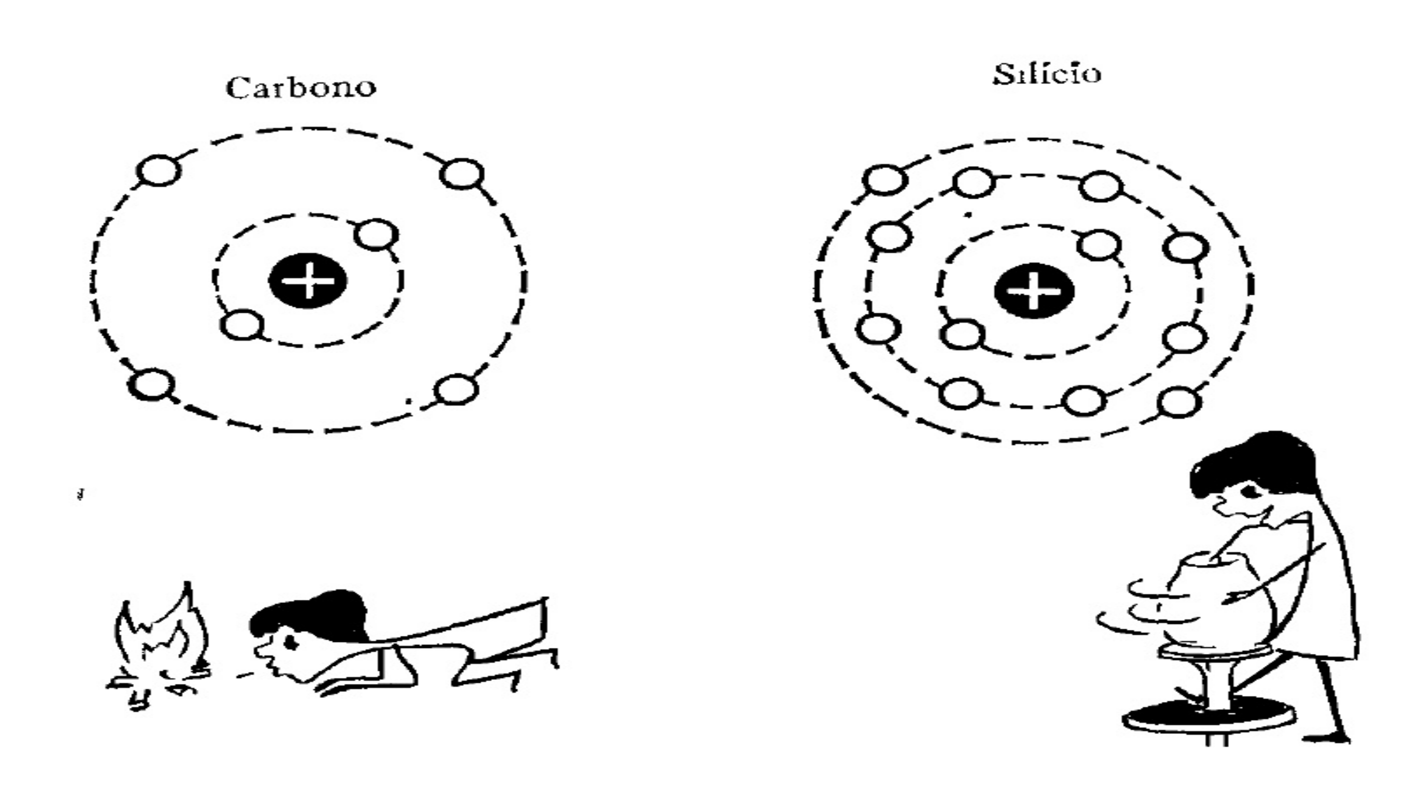
Más adelante hablaremos sobre la irradiación. Para la comprensión del material futuro es importante saber que el movimiento del electrón

en el átomo casi no tiene nada en común con el de los planetas por sus órbitas. Si fuese posible fotografiar el átomo de hidrógeno en estado de energía mínimo (el sistema más simple) con una exposición grande, veríamos una nube con densidad máxima a cierta distancia determinada del núcleo. Esta distancia se puede tomar por una analogía burda del radio de la órbita. La fotografía del átomo no se parecería en nada a la figura acostumbrada del sistema solar, sino, más bien haría recordar una mancha difusa obtenida al sacar la foto de una mariposa nocturna revoloteando sin orden ni concierto alrededor de un farol*.

En cuanto a la estructura de los átomos complejos tenemos que asimilar firmemente las siguientes cosas. Los electrones en los átomos se disponen por capas o, como se dice, por envolturas. El número de sitios vacantes en cada capa es estrictamente limitado. En la envoltura interior más próxima al núcleo sólo pueden caber dos, en la siguiente ya ocho, etc. Cuanto más lejos está del núcleo, tanto mayor es la cantidad permitida de electrones, pero siempre queda limitada. Estas reglas no las imponen las fuerzas eléctricas, sino las rigurosas normas mecánico-cuánticas. Es el requerimiento del principio de exclusión de Pauli, cuya esencia consiste en que los electrones idénticos por sus propiedades no pueden, además, ser idénticos por su estado. "¡Aunque sea en alguna cosa, pero diferenciaos!"— tal es la orden de la naturaleza.

* Aquí se debe tener en cuenta el parecido de los cuadros solamente en promedio durante el tiempo de exposición. El movimiento del electrón no se puede identificar, en modo alguno, con el revoloteo de una mariposa, como tampoco con el movimiento de cualquier otro cuerpo macroscópico.

El aumento del número de electrones en el átomo y la formación de nuevas capas llenas de electrones no se acompañan de ensanchamiento del átomo. El crecimiento de la carga positiva del núcleo atómico provoca la compresión de las envolturas interiores. De este modo, las dimensiones de todos los átomos determinadas por los radios de las capas exteriores resultan aproximadamente iguales, en tanto que los electrones internos se acercan cada vez más apretadamente al núcleo a medida que su carga se acrecienta.



Estas regularidades en la estructura de los átomos se manifiestan en plena medida cuando los átomos se encuentran unos con otros. Durante el encuentro éstos entran en contacto por medio de sus envolturas exteriores, y aquello que tiene lugar en las profundidades del átomo ya no es tan esencial. Lo principal es cuántos electrones se hallan en la periferia del átomo. Su número, en la práctica, determina por completo los "pro-

pósitos" que revelan los átomos al aproximarse: si se van a enlazarse unos con otros o si quieren volver cada uno a su sitio. Se puede afirmar sin vacilación, que los átomos reciben uno al otro exclusivamente "conforme ven el traje", aunque el propio "traje" viene determinado por el corazón del átomo, por su núcleo.

El número de los electrones exteriores varía periódicamente a medida que aumenta la carga del núcleo. Después de la completación de una envoltura comienza la construcción de la otra, más alejada ya del núcleo. Aquí está la llave para descubrir la idea física del sistema periódico de los elementos de Mendeléiev pues las propiedades químicas de los átomos se determinan por el número de electrones exteriores cuya ligazón con el núcleo es mínima.

No es difícil comprender que cuanto menos electrones contiene la envoltura exterior, tanto más débil es su enlace con el núcleo. A grandes rasgos, los electrones interiores junto con el núcleo pueden examinarse como ion positivo. Si la envoltura exterior tiene un solo electrón (los metales típicos son el litio, el sodio, etc.) éste se atrae por la carga del ion igual a una unidad en el sistema atómico de unidades.

Cuando en la capa exterior se tienen dos electrones (el berilio, el calcio, etc.) cada uno de éstos se atrae al centro con una fuerza dos veces mayor, ya que la carga eléctrica de la parte restante del átomo es igual a dos, etc. Con el aumento del número de electrones exteriores aumenta también la carga del ion positivo, incrementa la fuerza de atracción de los electrones, disminuye el radio de las órbitas y se acrecienta la estabilidad del enlace. El enlace es máximamente estable cuando la envoltura exterior está llena por completo. Semejante cosa tiene lu-

gar para los gases inertes: helio, neón, argón y otros. El número de electrones en la envoltura exterior es igual a dos para el helio y ocho para todos los demás.

Núcleo atómico

En el átomo las fuerzas eléctricas son principales. Dentro del núcleo su papel es relevante, pero no es ya principal. Los protones del núcleo cargados positivamente están situados extraordinariamente cerca unos de otros y, por lo tanto, no pueden dejar de entrar en acción. Se repelen mutuamente con una fuerza enorme, y de no haber fuerzas nucleares más poderosas, el núcleo no podría existir. Los protones se disiparían volando en diferentes direcciones con velocidades próximas a la de la luz.

Las poderosas fuerzas culombianas de repulsión convierten el núcleo en algo similar a un muelle comprimido que pugna por enderezarse. Los átomos de los elementos pesados tienen un número tan grande de protones (el uranio, por ejemplo, los tiene 92) que los núcleos se tornan inestables. Las fuerzas nucleares de atracción que en los núcleos ligeros aplastan por completo la repulsión eléctrica, en el uranio, con dificultad, oponen resistencia a ésta. Es suficiente un impulso insignificante (el impacto de un neutrón) para que el núcleo se desintegre en dos mitades que se separan volando a enormes velocidades por la acción de las fuerzas de repulsión. Precisamente a costa del trabajo de las *fuerzas eléctricas* se libera la energía en el reactor atómico y durante la explosión de la bomba atómica. La así llamada energía nuclear que se desprende aquí es, en esencia, energía electromagnética.

Dos tipos de fuerzas entre los átomos

No representa dificultad alguna demostrar la existencia de fuerzas considerables entre los átomos (o moléculas) neutros. ¡Haga el intento de romper un palo grueso! Y es que éste, en fin de cuentas, consta de átomos. Entre los átomos pueden actuar dos tipos de fuerzas eléctricas de naturaleza completamente diferente. Uno de estos tipos tiene su analogía simple en la interacción de los cuerpos grandes y es "muy digno de respeto", pues en su base, es clásico.

A otro tipo pertenecen las fuerzas mecánico-cuánticas que, con frecuencia, se denominan de intercambio. Éstas pueden calcularse con la ayuda de la mecánica cuántica, pero si uno trata de crear un cuadro patente de aparición de estas fuerzas, dicho cuadro inevitablemente será incompleto. Aquello que se desarrolla en un átomo no se puede describir en su totalidad, valiéndose del lenguaje de la física clásica, es decir, recurriendo al idioma científico únicamente evidente para las personas cuya experiencia cotidiana, en su conjunto, es la de contemplación de los fenómenos que se someten a la clásica.

A grandes distancias, entre los átomos actúan tan sólo fuerzas clásicas. En este caso la interacción de los átomos manifiesta, indudablemente, un desprecio —si no total, por lo menos bastante notable— a los pormenores de la estructura de los propios átomos. Tanto la interacción de los átomos aislados, como la de grupos de átomos reunidos en moléculas está sujeta a una misma ley. Precisamente debido a esta razón el tipo dado de fuerzas lleva el nombre de *molecular*. Es que el átomo puede considerarse como un caso particular de la molécula, su forma más simple. A veces, estas fuerzas se denominan las

de Van der Waals, por el nombre del científico holandés quien por primera vez las introdujo en la teoría de los gases y las aplicó para explicar la licuación de los mismos.

A distancias considerables ni los átomos ni las moléculas no se repelen. Los vecinos alejados siempre tienden a reunirse. Las fuerzas moleculares a grandes distancias son fuerzas de atracción.

Las fuerzas de intercambio aparecen durante la aproximación de los átomos, cuando sus envolturas exteriores comienzan a entrar en contacto. Aquí ya se revela por completo la individualidad de la pareja que se encontró. Los átomos ya sea que forman un sistema estable, una molécula, o bien, se repelen enérgicamente.

La combinación de los átomos en una molécula ya pertenece al campo de la química. Ésta es la causa de que las fuerzas mecánico-cuánticas de enlace se llaman, con frecuencia, químicas.

Si se trata de acercar los átomos a una distancia menor que la suma de sus radios, entre éstos, obligatoriamente, se engendrarán las fuerzas de repulsión. No se logrará introducir por fuerza un átomo en el seno del otro.

Cabe subrayar que la base de las fuerzas tanto moleculares, como químicas la forma la interacción *electrostática*. Las fuerzas magnéticas no desempeñan un papel algo esencial.

Y ahora formemos una idea algo más detallada acerca de ambos tipos de fuerzas.

Fuerzas moleculares

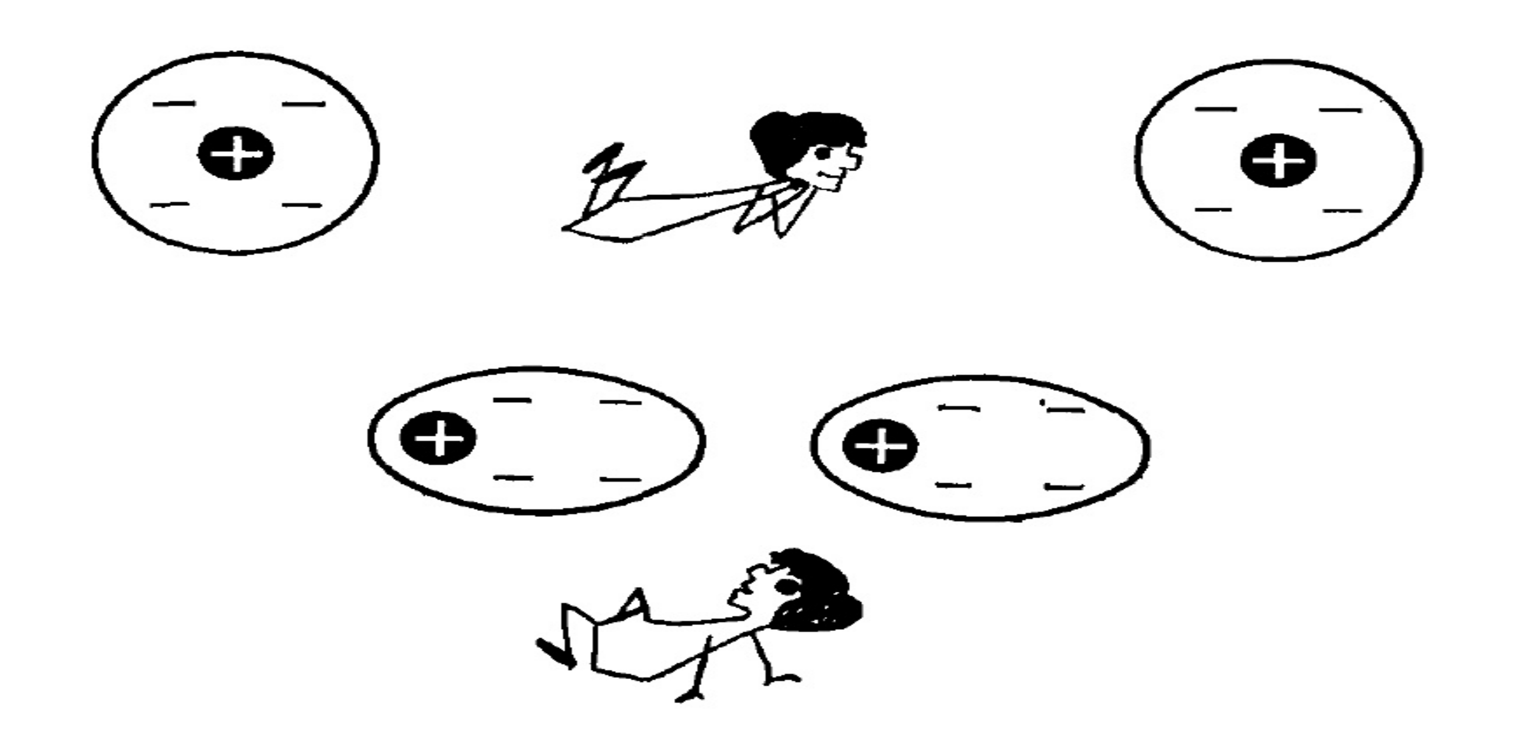
¿Cómo aparece la atracción molecular entre los sistemas eléctricamente neutros? Primeramente procuraremos entender por qué los pequeños fragmentos de papel u otros objetos ligeros se atraen a un cuerpo electrizado.

He aquí que una varilla cargada positivamente se aproxima a una tira de papel. Las partículas cargadas de los átomos del papel no pueden quedar indiferentes frente a esta acción. Los electrones se desplazan al encuentro de la carga positiva, en tanto que los núcleos retroceden algo. Tiene lugar el fenómeno que los físicos denominan polarización. La carga negativa se ve situada más cerca del cuerpo electrizado que la positiva, y la fuerza de atracción obtiene el predominio sobre la de repulsión.

Si en lugar del pedacito de papel se encontrase una sola molécula, transcurriría lo mismo. El campo eléctrico a semejanza del viento, lleva los electrones ligeros un poco aparte de los núcleos, y la molécula se transforma en dipolo eléctrico en que las cargas de signos opuestos están separadas espacialmente.

En muchas sustancias, por ejemplo en el agua, las moléculas al nacer resultan ser, inmediatamente, semejantes al dipolo eléctrico. Estas moléculas con su campo eléctrico, provocan la polarización de los vecinos y la aparición de las fuerzas de atracción.

Solamente en el caso de que la nube electrónica de cada uno de los átomos posee simetría esférica total entre éstos no se engendrarán fuerzas de atracción. Sin embargo, en la realidad tan sólo en término medio durante un tiempo lo suficientemente largo, se puede afirmar que el "centro de gravedad" de la carga negativa se encuentra en el núcleo del átomo aislado. En el momento dado el electrón (si, para simplificar, hablaremos sobre el átomo de hidrógeno) puede ser detectado en cualquier punto a una distancia de cerca de 10^{-8} cm del núcleo. Al acercarse al otro átomo, el campo eléctrico del sistema electrón — núcleo perturba el movimiento del electrón del átomo vecino de modo tal que el "centro



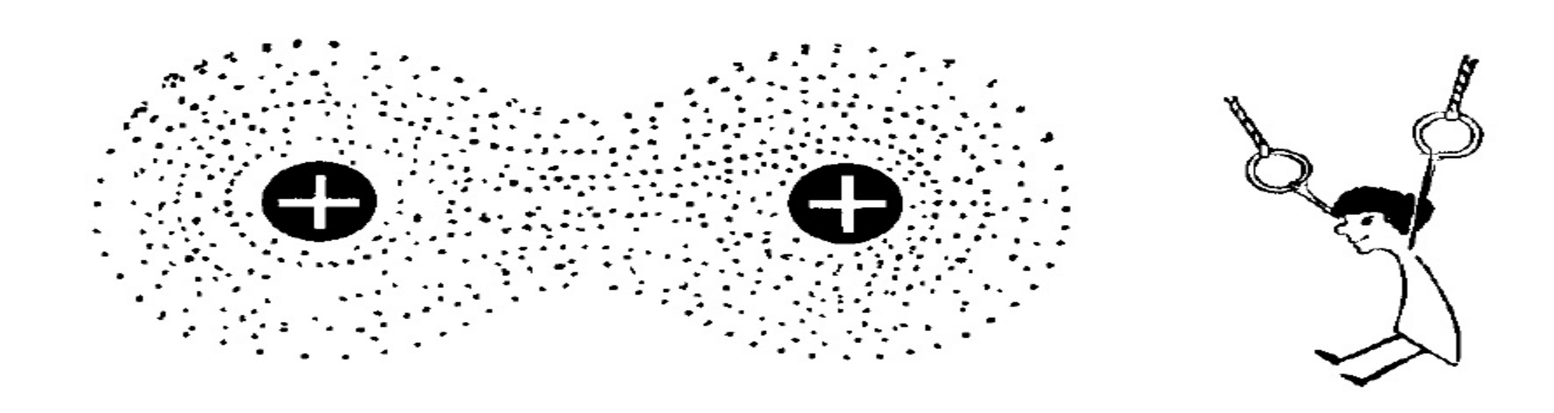
de gravedad" de la carga negativa del átomo resulta desplazado respecto al núcleo. Cada átomo (o molécula) polariza a su vecino, y éstos comienzan a atraerse unos a otros.

Esta interacción en su base es culombiana. Pero, por cuanto la atracción entre los sistemas neutros es consecuencia de cierta prevalencia sobre la simultáneamente existente repulsión y debido a que el grado de polarización de los sistemas se debilita de una manera brusca con el aumento de la distancia, estas fuerzas son mucho más débiles que las puramente culombianas y disminuyen con la distancia mucho más rápidamente: son inversamente proporcionales no al cuadrado, sino *al séptimo grado de la distancia*. Al aumentar la distancia dos veces, la fuerza disminuye no 4, sino ¡128 veces! Por esta razón, dichas fuerzas, prácticamente, ya no ejercen influencia si la distancia supera 10 veces las dimensiones de las propias moléculas. Las fuerzas de Van der Waals son las de corto alcance.

Ya Faraday conjeturaba que las fuerzas químicas son de naturaleza electromagnética. "Los átomos de materia —escribía el científico— no se sabe de qué modo, pero están dotados de fuerzas eléctricas o vinculados con éstas, y es a éstas a las cuales deben sus cualidades más remarcables, incluyendo su afinidad química recíproca". Actualmente, la naturaleza eléctrica de las fuerzas químicas quedó estrictamente demostrada.

Las fuerzas de Van der Waals no son capaces de explicar la formación de las *moléculas*. En primer lugar, son demasiado débiles para este fin. Pero esto *no es lo más importante*. El enlace químico, similarmente a la amistad íntima entre las personas posee una propiedad insólita de *saturación*. El átomo de hidrógeno puede unir a sí mismo sólo un átomo igual, pero en ningún caso dos o tres. El átomo de carbono es capaz de asociar cuatro átomos de hidrógeno, pero no más, etc. Esta propiedad, desde el principio, parece enigmática. Ningún tipo de fuerzas que tratamos hasta el momento no acusaba la propiedad de saturación. Una estrella, por ejemplo, análogamente al orador que puede estar en contacto con el auditorio de cualquier magnitud es capaz de atraer cualquier numero de planetas. La fuerza que actúa sobre uno de éstos depende en modo alguno de la presencia de los demás. Tampoco conocen la saturación las fuerzas electromagnéticas entre las partículas cargadas. Ni tampoco las fuerzas de atracción molecular.

La propiedad de saturación se expresa en la química por el concepto de valencia, que fue introducido mucho antes de que los científicos pudieran abordar el problema del esclarecimiento de la naturaleza de las fuerzas químicas.



En rasgos más generales, el enlace químico puede explicarse como resultado de la *colectivización* de los electrones periféricos (electrones valencia) de los dos átomos que se combinan. A distancias determinadas entre los núcleos los electrones colectivizados, al pasar entre los núcleos, compensan la repulsión de éstos. A distancias grandes la colectivización no se produce y actúan tan sólo las fuerzas de Van der Waals. La saturación viene condicionada por el número limitado de electrones que se colectivizan.

En la molécula más simple —la de hidrógeno— ambos electrones se comportan de un modo tal como si cada electrón pasase parte del tiempo cerca de un núcleo, y otra parte, cerca del otro. Ésta es la razón precisamente, por la cual las fuerzas se engendran debido a la colectivización de los electrones, con frecuencia reciben el nombre de fuerzas *de intercambio*. Sin embargo, no conviene entender la palabra "intercambio" en su sentido demasiado literal, o sea, como las fluctuaciones de los electrones de un protón a otro. Aquí falta este carácter patente propio de la mecánica clásica. El sentido verdadero del *efecto de intercambio* consiste en la colectivización simultánea de dos electrones por dos núcleos idénticos.

La forma de la nube electrónica de la molécula de hidrógeno (H_2) se diferencia en alto grado

de la nube esféricamente simétrica de los átomos aislados. El cuadro que se obtiene hace recordar, hasta cierto punto, la célula biológica en división antes de su división completa.

Los núcleos atómicos corresponden a los de las células hijas, y la carga electrónica, al protoplasma*. La banda de protoplasma retiene las células una cerca de la otra mientras no finalice el proceso de división. En el caso de la molécula el mismo papel lo desempeña la banda de "protoplasma electrónico". Éste origina la atracción mutua de los núcleos por las fuerzas culombianas, como si entre los mismos estuviese concentrada cierta parte de la carga eléctrica negativa. Para las distancias no demasiado pequeñas entre los núcleos, las fuerzas originadas por la colectivización de los electrones compensan "con creces" la repulsión de los núcleos. Ahora bien, cuando las distancias son muy pequeñas, la parte de la carga negativa concentrada entre los núcleos pasa a ser insuficiente. Los electrones parece como si se expulsaran del espacio entre los núcleos a la zona exterior, y la repulsión de los núcleos ya no se compensa.

De este modo, tanto la atracción, como la repulsión obtienen una explicación total.

Si se combinan átomos diferentes, los electrones colectivizados se mueven de una manera no simétrica con respecto a los dos núcleos. Este fenómeno se manifiesta en una forma particularmente acusada en las llamadas moléculas heteropolares** (de distinto género), como las de sal común (NaCl), de ácido clorhídrico (HCl),

---

* Aquí y en adelante utilizamos la exposición muy expresiva de la naturaleza de las fuerzas químicas perteneciente al físico soviético Ya.I. Frenkel.

** A diferencia de las moléculas homopolares (del mismo género), como, por ejemplo, la molécula de hidrógeno.

etc. En la sal común, por ejemplo, el enlace se realiza por la colectivización de ocho electrones valencia: uno de sodio y siete de cloro. Por cuanto la carga residual del cloro es mayor, todos los electrones colectivizados se desplazan fuertemente al ion cloro, y la colectivización toma el aspecto de expropiación realizada por el átomo "más fuerte" que quita un electrón al átomo "más débil". Este último, hablando muy aproximadamente, se transforma en ion positivo, mientras que el primero se convierte en negativo, y el enlace químico se reduce a la atracción de las cargas de signo opuesto.

La distribución de los electrones pierde el carácter polar a medida que disminuyen las diferencias entre los núcleos, llegando a ser completamente simétrica en el caso de átomos idénticos.

La molécula no se puede representar como suma de átomos invariables mantenidos en equilibrio por las fuerzas de atracción y repulsión. Esta idea de Berzelius que data de un siglo y medio no es sino una simplificación muy aproximada.

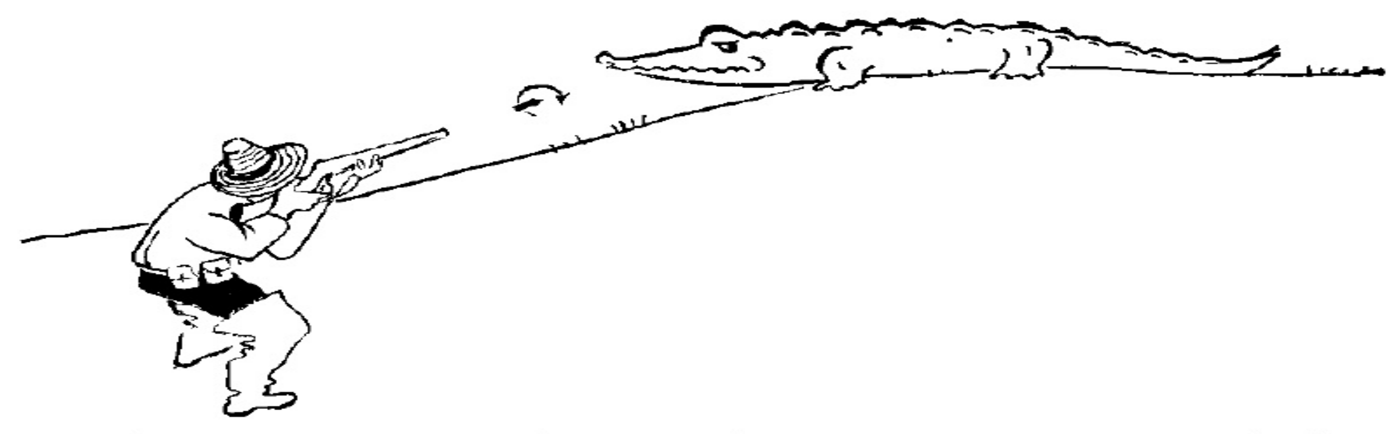
En la molécula no se tiene enlace interatómico por cuanto no hay átomos que puedan combinarse en una molécula permaneciendo invariables. Así, por ejemplo, estrictamente hablando, en la molécula de hidrógeno no existen átomos de este elemento ya que su individualidad se disuelve al combinarse en un sistema nuevo. Ésta sólo contiene la "materia prima" a partir de la cual los mismos pueden ser construidos: dos protones y dos electrones. Aquí radica la diferencia cardinal de las fuerzas químicas respecto a todas las demás que conocimos anteriormente. La molécula debe considerarse como suma do núcleos apantallados por los electrones internos y de electrones periféricos colectivizados cuyo movimiento depende de la distancia entre los núcleos.

Ahora nos queda por esclarecer de una forma más detallada el último momento importante: ¿qué es lo que determina la valencia del átomo? Aquí, tenemos que ponernos al tanto, preliminarmente, de una propiedad fundamental más de las partículas elementales, sobre la cual no hemos pronunciado todavía ni una sola palabra. Es el llamado *espín.* Precisamente el espín en unión con el principio de exclusión de Pauli permitió a Heitler y London en Inglaterra construir la teoría cuántica del enlace químico y explicar la valencia.

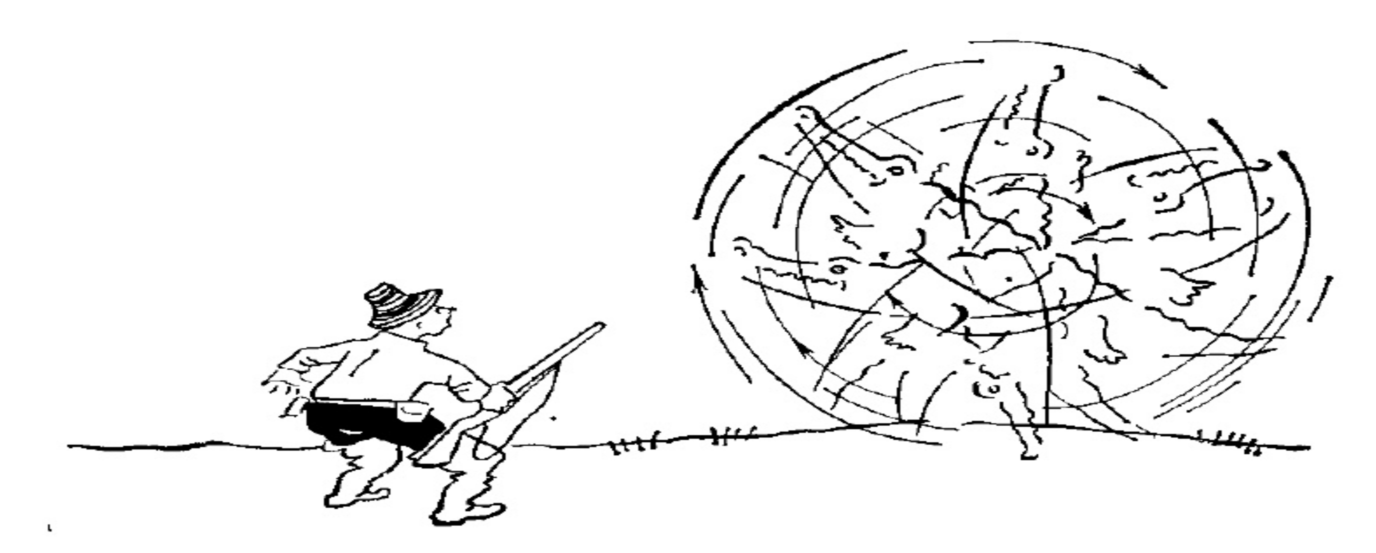
El espín corresponde de un modo palmario a algo calificado como "rotaciones propias" de las partículas. Sin embargo, sería ingenuo figurar una especie de trompos que giran alrededor de su eje. No se debe olvidar que las partículas no son, en modo alguno, bolitas y que en general no representan un objeto cuyo retrato hubiera podido dibujar incluso un pintor más sofisticado. En todo caso, un pintor naturalista. Nuestras representaciones patentes sirven bien en el mundo de las "cosas grandes", en el macromundo, pero poca ayuda pueden prestar cuando empezamos a estudiar los fenómenos del micromundo.

Al llegar aquí, el lector, después de haber leído con asombro que el espín por una parte está ligado con su rotación propia y que por otra parte al mismo tiempo ni hablar se puede sobre cualquier rotación mecánica patente, aquí, repetimos, el lector puede tener la sensación de que le maltratan y preguntar tajantemente: ¿qué es, entonces, el espín?

Si del cañon de un fusil estriado sale la bala, ésta gira en su vuelo alrededor del eje longitudinal, es decir, de aquel que coincide con la dirección del vuelo. Frigúrense ahora el momen-



to de caza cuando se dispara con unas balas giradas muy fuertemente (algo al estilo de Munchhausen). La bala incrustada en el blanco le comunicará su rotación, de modo que el blanco también comenzará a girar en el mismo sentido que la bala. Los físicos dicen que el momento de rotación que al principio sólo existía en la bala, se distribuyó entre la bala y el blanco en el cual ésta se incrustó. El momento de rotación de un sistema de cuerpos no es capaz por sí solo sin impacto desde fuera, de aumentar ni disminuir. Esta tesis constituye la médula de la cantidad de movimiento. Sin embargo, el quid de la cuestión no radica en los términos. Para nosotros no son de tanta importancia. Tampoco necesitaremos una formulación exacta de esta importantísima ley de conservación, la cual



con pleno derecho ocupa su lugar al lado de las leyes de conservación de la energía y de la cantidad de movimiento. Lo primordial es asimilar únicamente que por la rotación del blanco es posible (y, además, ¡con gran precisión y cuantitativamente!) juzgar sobre la rotación anterior de la bala.

Y ahora figúrense que el blanco se bombardea con electrones u otras partículas elementales, absorbiéndolas. Si todas las partículas tienen su giro orientado en un mismo sentido, entonces, al absorberse deben comunicar la rotación al blanco. Bueno, de este modo resulta que cuanto mayor es el espín, con tanta mayor fuerza comienza a *girar el blanco*.

No hay necesidad de intentos infructuosos de buscar la explicación del espín en cualesquiera cuadros mecánicos. Los experimentos con el blanco nos proporcionan el esquema de principio de cómo puede *medirse* este espín, el hecho que de por sí vale mucho.

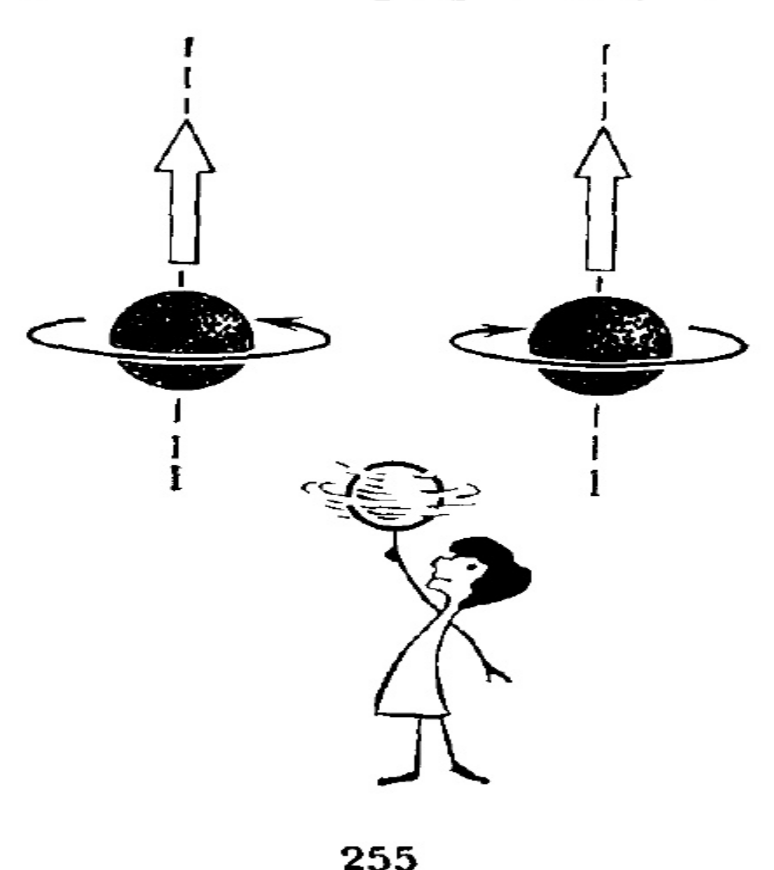
Se sobreentiende que hemos tocado solamente la superficie del fenómeno y que tras ésta se encierran las particularidades complejísimas de las leyes del movimiento y de la interacción de las partículas elementales... Sea como fuere, incluso este aspecto exterior del problema nos permite comparar los espines de distintas partículas y, por lo tanto, nos permite formar cierta idea acerca de la nueva propiedad de los objetos del micromundo.

Por supuesto, el experimento con el blanco que acabamos de describir es una representación muy aproximada de los experimentos reales, pero no conviene complicar nuestro relato con pormenores superfluos.

Así, pues, figúrense que se tira contra el blanco —supongamos que intervenga como tal una pequeña moneda corriente— con un fusil que dispara partículas elementales giradas en un solo

sentido. En este caso se pone de manifiesto una circunstancia muy interesante. Para un número igual de impactos toda una serie de partículas: electrones, protones, neutrones y algunas otras, transmitirán al blanco un momento igual de la cantidad de movimiento. Por consiguiente, estas partículas tienen el mismo espín. Las partículas de la luz, los fotones, transmitirán al blanco un momento rotacional dos veces mayor, y algunas partículas, como, por ejemplo, los mesones π no darán lugar a la rotación en absoluto. Su espín es igual a cero.

El valor cuantitativo del espín se conoce con gran precisión: éste es igual ya sea a 0, o bien a $\frac{\hbar}{2}$, o es igual a $\hbar$, donde $\hbar$ es la famosa constante de Planck, el cuanto de acción, y más tarde tendremos que tratar con ésta reiteradas veces. El espín del electrón es igual a $\frac{\hbar}{2}$. La constante de Planck es tan pequeña (un número con



27 ceros después de la coma decimal) que el blanco moneda realizará una revolución por segundo solamente en el caso de que seguiremos bombardeándolo durante 10 000 000 000 000 000 años, haciendo mil "disparos" por segundo. Puede parecer dudoso que tiene sentido hablar sobre una magnitud tan ínfima, sin embargo, no conviene apresurarse. En este caso, la situación se asemeja mucho a aquella que se produciría si tratásemos de provocar la rotación de la Luna disparando contra ésta con un fusil estriado. No es muy razonable hablar sobre el espín "pequeño" o sobre el "grande": es que en el micromundo son válidas las escalas inusitadas para nosotros. Lo importante es que el espín resulta ser esencial en muchos casos, en particular, al combinarse los átomos para formar una molécula.

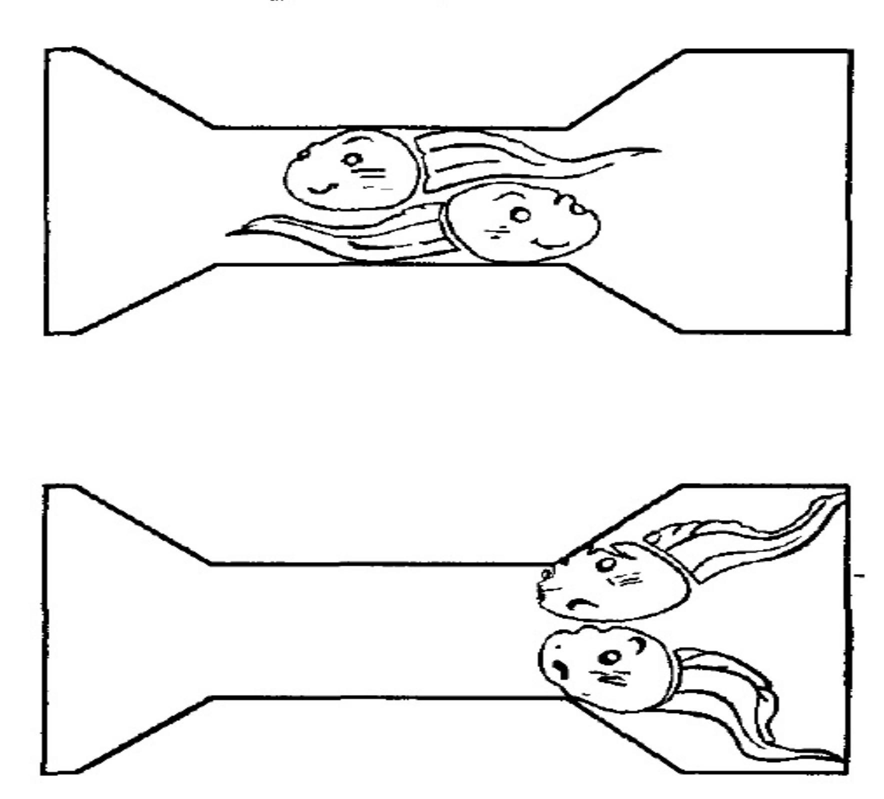
Como lo demuestra la experiencia, al electrón se le puede impartir giro solamente por dos procedimientos: la rotación del electrón forma el tornillo derecho o el tornillo izquierdo con la dirección de su movimiento. En correspondencia, también puede girar el blanco. En otras palabras, son posibles nada más que dos orientaciones del espín con respecto a cualquier dirección. Debido a esta causa, *si el espín de un electrón es fijado, entonces el espín del otro electrón es paralelo o es antiparalelo al mismo.*

¿Qué determina la valencia de los átomos?

La orientación recíproca de los espines resulta ser un factor decisivo durante la formación de la molécula de hidrógeno. El enlace químico aparece sólo en el caso de que los electrones que se colectivizan tienen espines orientados en direcciones opuestas. Al chocar los átomos de hidrógeno con espines paralelos, los electrones también se colectivizan por cierto lapso, pero no

se crean estados estables. En este caso la colectivización da lugar a la aparición de las fuerzas de repulsión, independientemente de las distancias entre los átomos.

Se trata de que la *orientación recíproca de los espines determina según la mecánica cuántica el carácter del movimiento de los electrones.* Los electrones con los espines antiparalelos pasan un tiempo relativamente mayor entre los núcleos, de modo que la densidad media de la carga negativa resulta suficiente para compensar la repulción de los núcleos. Cuando los espines son paralelos, dicha densidad es pequeña y tiene lugar la repulsión.



Los electrones con los espines orientados igualmente no pueden apretujarse de una vez en el espacio entre los núcleos, como si aquéllos fuesen dos renacuajos que con las cabezas juntas se afanan por colarse simultáneamente en una rendija estrecha. El espacio internuclear es accesible para los electrones con los espines opues-

tos, al igual que la estrecha rendija lo es para los renacuajos “antiparalelos”. Sin embargo, se sobreentiende que aquí no hay absolutamente nada en común, salvo el resultado final. El electrón no es un renacuajo y no hay comparación alguna, ni alusión a hechos conocidos de la física clásica que ayude a comprender (si se queda en las posiciones clásicas) por qué la orientación del espín influye en una medida tan esencial sobre el movimiento de los electrones: todo el efecto es puramente cuántico.

Así, pues, los enlaces químicos forman pares de electrones que tienen espines antiparalelos.

Ahora está presente todo lo necesario para la explicación de la saturación y de la valencia. Comencemos por lo sencillo. ¿Por qué la molécula de hidrógeno H_2 no puede unir a sí misma un átomo más? ¿Cuál es la causa que impide unir a la vez, por ejemplo, los tres núcleos con tres electrones?

Esta cosa está prohibida por el principio de exclusión de Pauli. Los electrones colectivizados se encuentran en un mismo estado cuántico y por tal motivo están obligados a diferenciarse por la orientación de los espines. ¡Pero sólo dos orientaciones son posibles! Debido a ello, a dos electrones con los espines antiparalelos se permite realizar el enlace, mientras que el tercero resulta aquí absolutamente sobrante.

Después de que la molécula de hidrógeno se haya formado, siempre repelerá los átomos de hidrógeno. Lo dicho explica la saturación.

He aquí otra cosa a la que es necesario prestar atención en este caso. Cada uno de los átomos de hidrógeno que se asocian en la molécula tiene *un solo electrón con el espín orientado arbitrariamente*. La molécula de hidrógeno posee *un par de electrones con los espines antiparalelos y no une a sí misma nuevos átomos*.

Este hecho es de valor general. Los electrones que forman pares con los espines antiparalelos en cada uno de los átomos no participan en el enlace químico. Semejante enlace lo pueden realizar tan sólo los electrones con los espines libres.

En las envolturas internas llenas por completo los electrones siempre forman parejas y no toman parte en el enlace químico. Acusan el mismo carácter las envolturas periféricas de los gases nobles que por esta causa en estado no excitado son completamente inactivos desde el punto de vista químico. Sólo en caso de que la envoltura externa del átomo no está llena por completo, sus electrones pueden crear el enlace químico.

¡Pero no todos los electrones! El número de electrones que poseen espines "libres" y, por consiguiente, también la *valencia del átomo es igual ya sea al número de electrones periféricos que no forman parte de las envolturas cerradas, o bien es igual al de electrones que faltan para completar la envoltura en dependencia de cuál de estos números es menor.*

De este modo resulta que, a pesar de su valor ínfimo si se juzga a escala macroscópica, el espín del electrón determina toda la "química" de los átomos. En tanto que transcurren a gran escala, las reacciones químicas comenzando por la simple combustión y terminando con las transformaciones complejísimas en el seno del organismo vivo, provocan cambios en el mundo que modifican todo su aspecto.

Gases, líquidos y sólidos

Si tratamos de figurarnos en rasgos más generales la estructura de los gases, líquidos y sólidos, podremos presentar el siguiente cuadro. Las moléculas (o átomos) de los gases recorren raudas, como velocistas, el espacio lleno de gas.

Las distancias entre las mismas superan considerablemente sus propias dimensiones. En su vuelo chocan cada vez unas con otras, precipitándose en zigzags más antojosos de un lado para otro.

La molécula del líquido se comporta de otro modo. Apretada como en una jaula entre otras, realiza su "carrera" en un mismo sitio (oscilando en torno a la posición de equilibrio). Tan sólo de tiempo en tiempo hace un salto, abriéndose paso a través de las "barras de la jaula", pero inmediatamente va a parar a una nueva jaula formada por nuevos vecinos. El período de su vida sedentaria dura cerca de una diezmillonésima fracción de segundo.

Los átomos de los cuerpos sólidos no están en condiciones de romper las "trabas" que los unen a sus vecinos más próximos y su destino es realizar carreras sin apartarse del punto en que se encuentran. Es verdad que también éstos pueden de vez en cuando abandonar la posición de equilibrio, pero semejantes cosas ocurren raras veces.

No se puede dejar de mencionar otra diferencia importante entre los cuerpos líquidos y sólidos. Hablando metafóricamente, el líquido es una muchedumbre caótica y densamente apretada de individuos que se empujan nerviosamente, sin apartarse de su lugar. En cuanto al sólido, éste representa, por regla general, una cohorte alineada cuyos individuos, aunque no se encuentran en la posición de firmes debido al movimiento térmico, pero mantienen entre sí unos intervalos determinados. Si se unen los centros de las posiciones de equilibrio de los átomos o moléculas se obtendrá una red regular (se sobreentiende que se trata de una red espacial, y no plana) que lleva el nombre de cristalina. La mayoría de los sólidos tiene estructura cristalina. Solamente en los cuerpos amorfos, como, por ejemplo,

en el vidrio, no hay orden estricto en la disposición de las moléculas. Ésta es la razón de que, con frecuencia, estos cuerpos no se quieren incluir en la clase de sólidos, considerándolos como líquidos muy viscosos, casi por completo carentes de fluidez.

Propiedades elásticas de los líquidos y gases

Ahora el lector ya dispone de datos indispensables para comprender el origen de las fuerzas elásticas en los líquidos y gases. Si tiene deseo, puede por sí mismo abordar este tema. Haga un intento y si no se deja llevar por la holgazanería, atinará aquello de que se puede leer a continuación, pues esta lectura será un poco aburrida, de modo que puede seguir enterándose sobre el tema directamente desde el relato acerca de la tensión superficial que es un fenómeno mucho más complejo.

En los gases y líquidos (excepto los metales líquidos) entre las fuerzas de atracción sólo actúan las de Van der Waals, a las cuales en los sólidos se añaden, además, las de intercambio.

Las fuerzas de Van der Waals retienen las moléculas del líquido unas junto a las otras a unas distancias próximas del orden de las dimensiones de las propias moléculas. Si se procure comprimir el líquido, sus moléculas comenzarán a acercarse mutuamente y entre ellas irán creciendo con rapidez las fuerzas de repulsión. En este caso no se debe olvidar que las moléculas están situadas tan apretadamente que ya para un acercamiento insignificante las fuerzas de repulsión alcanzan un valor grande.

¿No es verdad que comprender esta cosa es tan fácil como comprender por qué es tan difícil entrar en un autobús atestado de gente?

Tampoco presenta gran dificultad explicar por qué el líquido posee las propiedades de fluidez y no es capaz de conservar su forma. Por acción de una fuerza externa (de ordinario es la atracción hacia la Tierra) los saltos de las moléculas del líquido, de los que hemos hecho mención, tienen lugar en la dirección en que actúa la fuerza, y como resultado el líquido fluye. Lo único que se necesita es que el tiempo de accion de la fuerza sea mucho mayor que el de vida sedentaria de las moléculas. De lo contrario la fuerza sólo provocará la deformación elástica de cizallamiento y el agua común y corriente se tornará dura como acero.

Durante el calentamiento, la energía del movimiento térmico de las moléculas crece y los saltos de éstas se hacen más frecuentes. Finalmente, las fuerzas de Van der Waals se ven incapaces de retener las moléculas afanosas de lanzarse por todos los lados y el líquido deja de existir. Se forma un gas.

Las moléculas del gas se precipitan volando en todas las direcciones y la atracción molécular ya pierde su poder sobre ellas. La sustancia deja de conservar no sólo la forma, sino también el volumen. Por mucho ampliemos el recipiente que contiene gas, éste lo llenará completamente sin cualesquiera esfuerzos por nuestra parte.

El golpeteo incesante, a guisa de redoble de tambor, de las innumerables moléculas de gas contra las paredes del recipiente crea la presión.

Tensión superficial

Las fuerzas como la atracción, la elasticidad y el rozamiento saltan a la vista; las sentimos directamente todos los días. Sin embargo, en el mundo de los fenómenos cotidianos que nos rodea actúa una fuerza más a la que de ordinario

no prestamos atención alguna. Esta fuerza es relativamente pequeña y sus acciones nunca provocan efectos potentes. No obstante, no podemos echar agua en un vaso, ni en general tratar de algún modo un líquido sin poner en acción las fuerzas de las cuales vamos a hablar ahora. Éstas son las fuerzas de tensión superficial.

Nos hemos acostumbrado tanto a los efectos provocados por la tensión superficial que ya no nos fijamos en éstos; la única excepción es cuando nos divertimos haciendo pompas de jabón. Sin embargo, tanto en la naturaleza, como en nuestra vida a dichos fenómenos pertenece un papel bastante importante. Sin éstos no podríamos escribir con tinta. Una pluma corriente no extraería tinta del tintero y la estilográfica en el acto echaría un borrón grande, dejando vacío su depósito. No se podría jabonar las manos porque no se formaría la espuma. Cualquier lluvia menuda nos dejaría mojados hasta los huesos y el arco iris no se podría ver haga el tiempo que haga. Se alteraría el régimen hidrológico del suelo, hecho que tendría consecuencias desastrosas para las plantas. Se verían afectadas también funciones importantes de nuestro organismo.

Lo más simple es captar el carácter de las fuerzas de tensión superficial al observar la formación de una gota en el grifo mal cerrado o estropeado. Fíjense bien cómo paulatinamente crece la gota, después se forma el "cuello" y la gota se desprende. No es menester tener una rica fantasía para figurarse que el agua parece como si estuviese encerrada en un pequeño saco elástico, rompiéndose éste cuando el peso llega a superar su resistencia. Por supuesto, en la realidad en la gota no hay nada, salvo el agua, pero la propia capa superficial de la misma se comporta como una película elástica ensanchada.

La misma impresión la produce la película de la pompa de jabón. Ésta se parece a la fina goma estirada de un globo infantil. Si sacamos la pajita de la boca, la pompa se comprimirá expeliendo el aire.



Coloquen con cuidado una aguja sobre la superficie de agua. La película superficial se combará y no dará hundirse a la aguja. Por esta misma causa las ligeras hidrómetras pueden deslizarse rápidamente por la superficie de agua, como los patinadores sobre el hielo.

El alabeo de la película no permite derramarse al agua echada con cuidado en un cedazo bastante tupido. De este modo resulta que se puede "llevar agua en una canasta". Esto demuestra cuán difícil es, a veces, incluso si se tiene gana, decir un absurdo erdadero. Un tejido también es una especie de cedazo formado por entrelazamiento de hilos. La tensión superficial obstaculiza en alto grado la coladura del agua a través del tejido y, por lo tanto, éste no se moja al instante enteramente.

La película superficial en su afán de contraerse impartiría al líquido la forma esférica,

si no fuese por la gravedad. Cuanto menor es la gotita, tanto mayor es el papel que desempeñan las fuerzas superficiales en comparación con las volumétricas (gravitación). Ésta es la causa de que las pequeñas gotitas del rocío por su forma son próximas a la esfera. Durante la caída libre se origina el estado de imponderabilidad, y como consecuencia, las gotas de lluvia son casi estrictamente esféricas*. Debido a la refracción de los rayos solares en estas gotas aparece el arco iris. Si las gotas no hubieran sido esféricas, el arco iris, como lo demuestra la teoría, no existiría.

Las manifestaciones de las fuerzas tensoactivas son tan variadas que en nuestro libro ni siquiera tenemos la posibilidad de enumerarlas**. Pero estamos obligados a exponer, aunque sea de manera concisa, por qué se engendran estas fuerzas.

Si un grupo grande de individuos es susceptible de atraerse mutuamente o los individuos, por su voluntad, se lanzan al encuentro unos a otros, el resultado será un solo: se reunirán en una especie de ovillo semejante al enjambre de abejas. Cada individuo "procura" introducirse en el interior de este ovillo, debido a lo cual la superficie del mismo se reduce, aproximándose a la esfera. Tenemos ante nosotros el modelo de la aparición de la tensión superficial.

Las moléculas de agua (o de otro líquido) que se atraen unas a otras por las fuerzas de Van der Waals es, precisamente, la congregación de individuos que aspiran a acercarse. Cada molécula en

---

* Una pequeña desviación respecto a la esfericidad de las gotas se debe a la resistencia del aire. Dentro de la cabina de una nave cósmica el agua vertida se recogería en una esfera regular que planearía.

** Esto se ha hecho en el maravilloso libro de Ch. Boys *Pompas de jabón*.

la superficie se atrae por sus hermanas, tendiendo, por esta razón, a hundirse en la profundídad tanto en los cuerpos líquidos, como en los sólidos. Pero el líquido, a diferencia de los sólidos, es fluente debido a los saltos de las moléculas de una posición "sedentaria" a otra. Esta circunstancia permite al líquido tomar la forma para la cual el número de moléculas en la superficie sea *mínimo*, y la superficie *mínima* a volumen dado la tiene la esfera. La superficie de líquido disminuye y nosotros lo percibimos como tensión superficial.

Aquí es donde se pone de manifiesto que el origen de las fuerzas superficiales es completamente distinto del de las fuerzas elásticas de la película de goma dilatada. En efecto esto es así. Durante la contracción de la goma la fuerza elástica se debilita, mientras que las fuerzas tensoactivas no varían en modo alguno a medida que la superficie de la película disminuye, puesto que no cambia la distancia media entre las moléculas.

De este modo, el origen y la aparición de las fuerzas superficiales no pueden explicarse de una manera tan sencilla y patente como el de las fuerzas de elasticidad, donde todo está relacionado con el cambio de las distancias entre las moléculas. En el primer caso todo es más complicado, pues las fuerzas tensoactivas se manifiestan cuando tiene lugar la reestructuración compleja de la forma de todo el líquido sin la variación de su volumen.

Cuatro tipos de cristales

El diamante y la vela de parafina... El primero es el símbolo de la dureza; la parafina, análogamente a la cera, es blanda y dúctil. En el acto, se puede pensar que a la polaridad de las pro-

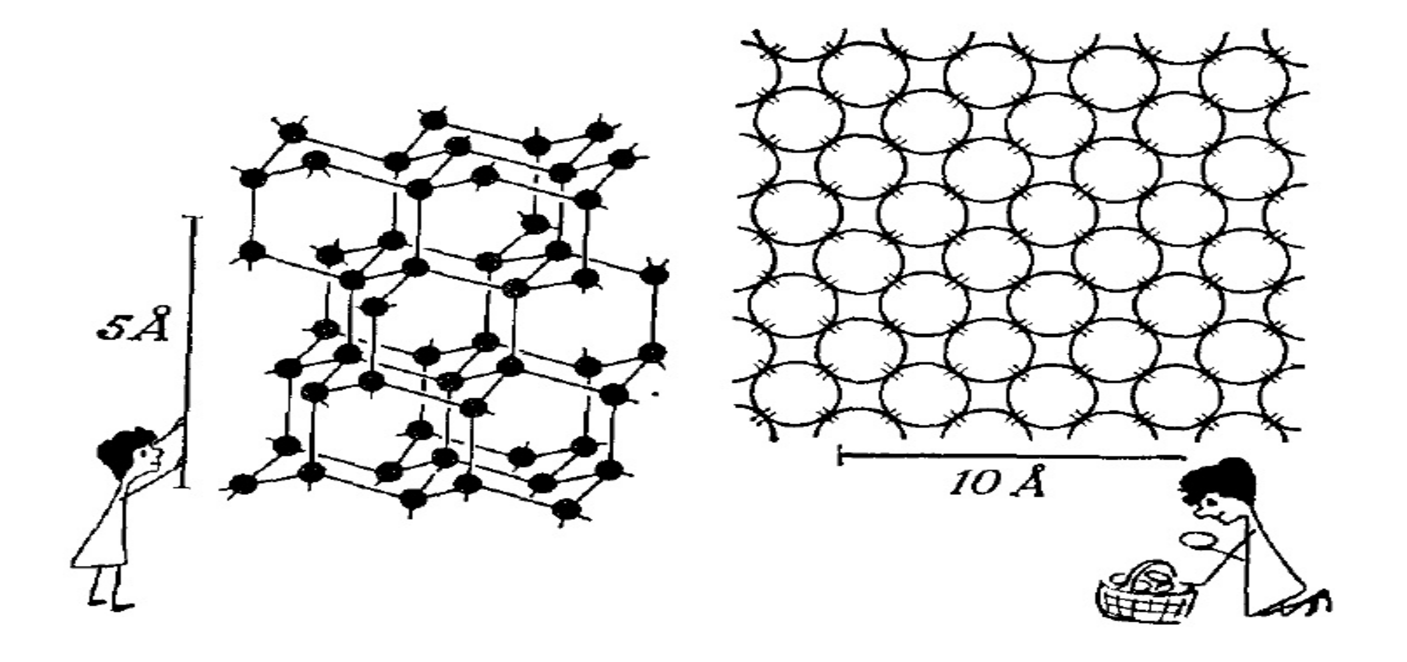
piedades le corresponde la polaridad de los métodos de acoplamiento en un todo único de los elementos aislados de los cuales constan estas sustancias.

Si éste es su idea, no se equivocará. La parafina consta de moléculas aisladas ligadas unas a otras por medio de las fuerzas de Van der Waals. El cristal de diamante puede considerarse como una molécula gigantesca. Las fuerzas de atracción molecular son mucho más débiles que las químicas, y en correspondencia, la parafina ni compararse puede por su dureza con el diamante.

Los cristales constituidos por moléculas aisladas se denominan *moleculares**. El diamante es un *cristal de valencia*.

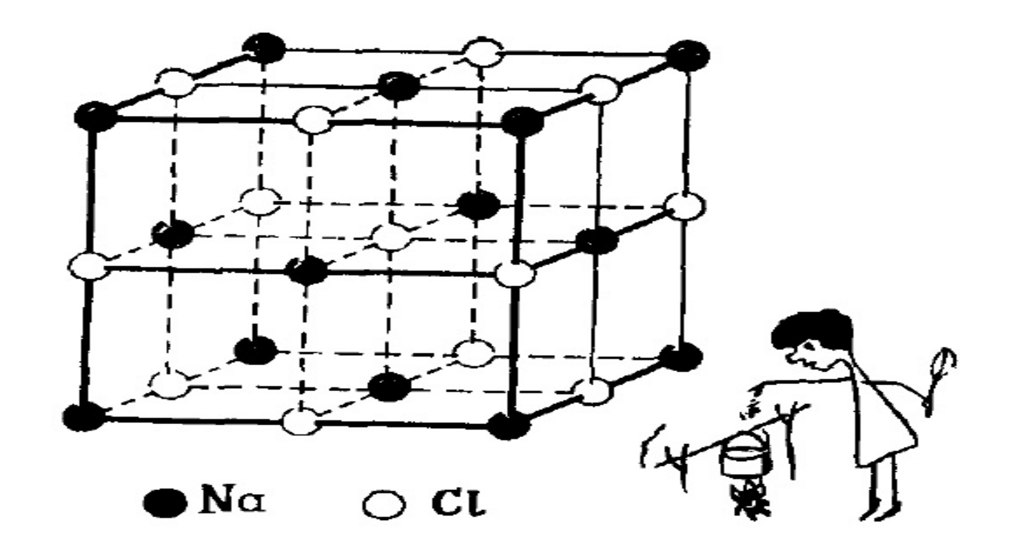
Este nombre no se le ha dado sin más ni más. El número de vecinos más próximos de cada átomo de carbono en el diamante es igual a su valencia, es decir, es igual a cuatro. Cualesquiera dos vecinos entablan entre sí un enlace de par de electrones, destinando con este fin un electrón cada uno. Pero no se debe pensar que el par colectivizado pertenece tan sólo a dos átomos. Del átomo a sus vecinos llevan cuatro senderos (enlaces) y el electrón valencia dado puede desplazarse por cualquiera de éstos. Al llegar al átomo vecino, puede pasar al siguiente y divagar por los senderos enlaces a lo largo de todo el cristal. En un esquema plano la red cristalina del diamante puede representarse en forma de circulitos apretados estrechamente unos contra otros, y los enlaces de valencia por pares de electrones, en forma de rayas en los puntos de contacto.

* Pertenecen a los cristales moleculares aquellos que constan de moléculas homopolares: los de hidrógeno, de nitrógeno, etc. El hielo seco (el dióxido de carbono sólido) y otras muchas sustancias orgánicas también son cristales moleculares.



La única regla irrevocable que deben observar los electrones es impuesta por el principio de exclusión de Pauli: por un "sendero" no pueden "andar simultáneamente más que dos electrones. Los electrones valencia colectivizados pertenecen a todo el cristal en su totalidad, y por este motivo, el cristal es en esencia una molécula colosal.

Los enlaces por pares de electrones en el diamante son muy resistentes y no se rompen con el aumento de la intensidad de las oscilaciónes térmicas de los átomos, es decir, con el aumento de la temperatura. Por esta causa el diamante no conduce corriente eléctrica. Los electrones valencia que participan en el enlace de los átomos están ligados sólidamente a la red cristalina y el campo eléctrico externo no ejerce influencia notable sobre su movimiento. Los cristales de silicio y germanio son semejantes al de diamante, pero sus enlaces por pares de electrones no son tan resistentes. Un pequeño calentamiento provoca la ruptura de algunos enlaces. Los electrones abandonan los senderos



hollados adquiriendo libertad. En el campo eléctrico externo se trasladan entre los nudos de la red, engendrando corriente eléctrica. Las sustancias de este tipo llevan el nombre de semiconductores.

La colectivización de los electrones valencia liga también los átomos de los llamados *cristales iónicos*: sal común (NaCl), bromuro de plata (AgBr), etc. Como recordará el lector, para la molécula de NaCl la colectivización en esencia se reduce a la expropiación de un electrón del sodio por el cloro. Lo mismo sucede en el cristal de sal común. Todos los electrones valencia se mueven de hecho por los nudos de cloro de la red, y el cristal, hablando a rasgos generales, consta de iones de signos contrarios. En este caso el enlace se asegura por las fuerzas electrostáticas de atracción.

El cuarto tipo de cristales viene representado por los *metales y las aleaciones*. Cuando un trozo de metal se forma a partir de átomos los electrones valencia pierden por completo el vínculo con el átomo, convirtiéndose en la "propiedad" de todo el trozo en su conjunto. Los iones positivos "nadan" en el "líquido" negativo formado por los electrones colectivizados. Este "líquido"

llena todos los espacios entre los iones y los "ata" por medio de las fuerzas culombianas. De este modo, el enlace reviste naturaleza química, al igual que en los cristales de valencia*.

Pero su diferencia respecto a los cristales de valencia es grande. En el caso de estos últimos los electrones colectivizados circulan por caminos estrictamente determinados entre los átomos vecinos. En el metal los electrones resultan libres y pueden trasladarse por todo el pedazo en cualesquiera direcciones. Esto se manifiesta de forma clara y precisa. Los metales y las aleaciones conducen bien la corriente eléctrica, mientras que los cristales de valencia en su mayoría son aisladores.

Un enlace muy débil de los electrones valencia de los metales con los átomos: he aquí la causa de la relativa libertad de que gozan los electrones dentro de los metales. Para los cristales de valencia este enlace es mucho más resistente.

De este modo, tan sólo en los cristales moleculares el enlace se efectúa por las fuerzas de Van der Waals. En los demás sólidos tiene lugar, de una u otra forma, la colectivización de los electrones. Es verdad que en los cuerpos amorfos, con frecuencia se realiza la superposición de los enlaces de distinta naturaleza. En los vidrios se opera simultáneamente, la interacción de valencia y la iónica; en los compuestos orgánicos complejos, la de valencia y la molecular, también al mismo tiempo.

Fin de la cadena de preguntas

Después de todo lo dicho acerca de las fuerzas que actúan entre los átomos y moléculas, así como

---

* La naturaleza del enlace en los metales líquidos es la misma que en los sólidos.

acerca de la estructura de los cuerpos sólidos, ya es del todo sencillo contestar a la pregunta de por qué durante el pandeo de la mesa se engendran las fuerzas de elasticidad. (Es menos fácil construir la teoría cuantitativa, pero ni siquiera nos proponemos a hacerlo.)

Cualquiera que sea la mesa: de madera, de material plástico o de metal, en todos los casos durante la compresión los átomos se acercan recíprocamente y debido a ello comienzan a repelerse. Se engendra la fuerza de elasticidad. Las fuerzas de cohesión entre los átomos y las moléculas impedirán la dilatación.

El libro colocado sobre la mesa comprime ligeramente la parte superior de la tabla y dilata la inferior. Este proceso dura hasta que las distancias entre los átomos cambien en una medida tal que la fuerza elástica equilibre el libro. Si el libro se quita de la mesa, las distancias interatómicas se restablecerán y la superficie de la mesa volverá a tener la forma anterior.

Aquí todo es sencillo. Si el lector ha comprendido lo principal: la naturaleza de las fuerzas eléctricas entre los sistemas neutros, entonces, con pleno derecho puede asegurar que el origen de las fuerzas de elasticidad dejó de ser para él un enigma.

Rozamiento seco

Así, pues, sabemos por qué el libro no se hunde a través de la mesa. Pero ¿qué es lo que le impide deslizarse si la mesa está un poco inclinada? ¡Por supuesto, el rozamiento!

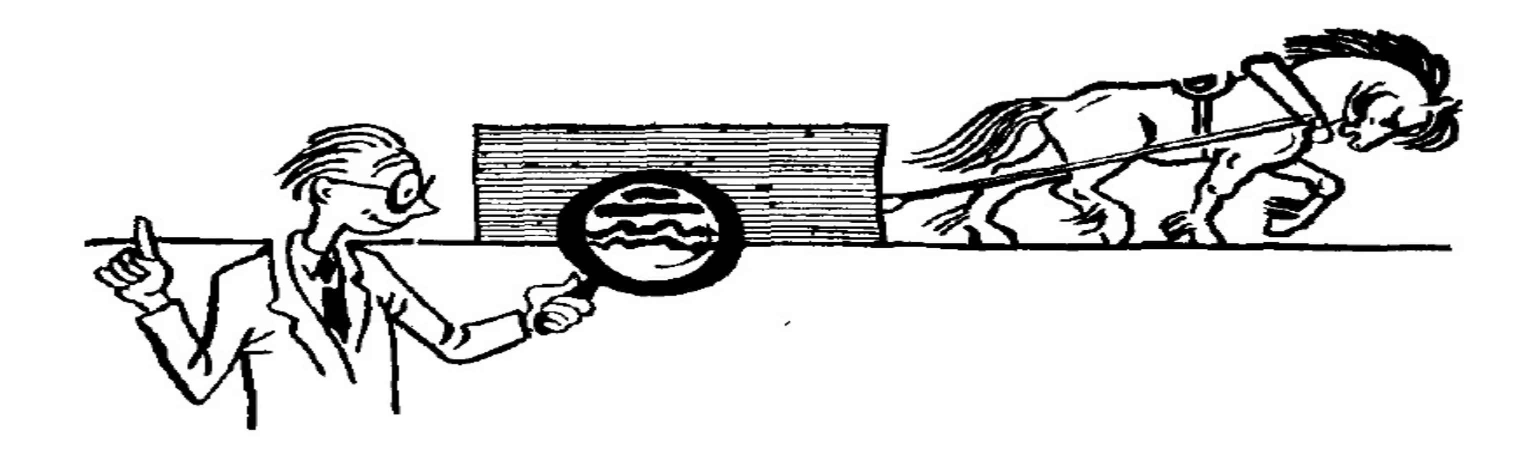
A primera vista es muy fácil explicar la procedencia de la fuerza de rozamiento. Es que tanto la superficie de la mesa, como la de la cubierta del libro son rugosas. Esto se percibe a tiento, y al observar con el microscopio se ve que la

superficie de un sólido recuerda ante todo un país montañoso. Salientes innumerables se adhieren unos a otros, se deforman un poco y no dejan deslizarse al libro. De este modo, la fuerza de rozamiento de reposo está provocada por las mismas fuerzas de interacción de las moléculas que la elasticidad habitual.

Si se aumenta la inclinación de la mesa el libro comienza a resbalar. Es evidente que en este caso se inicia la "nivelación" de los resaltes y la ruptura de los enlaces moleculares incapaces de soportar la carga creciente. La fuerza de rozamiento actúa como antes, pero será ya la fuerza de rozamiento de deslizamiento. Descubrir la "nivelación" de los resaltes no cuesta trabajo: el resultado de esta acción es el desgaste de las piezas que rozan.

Al parecer, con cuanto mayor esmero están pulidas las superficies, tanto menor debe ser la fuerza de rozamiento. Hasta cierto punto esto es así. El pulido disminuye, por ejemplo, la fuerza de rozamiento entre dos barras de acero. ¡Pero no ilimitadamente! Con el ulterior aumento del carácter liso de la superficie la fuerza de rozamiento comienza a crecer súbitamente. Es algo inesperado, mas a pesar de todo puede encontrar explicación.

A medida que las superficies se alisan, éstas se ajustan cada vez densamente unas a otras. Sin embargo, mientras la altura de las irregularidades supere varios radios moleculares, las fuerzas de interacción entre las moléculas de las superficies contiguas no se presentarán. Es que estas fuerzas son de muy corto alcance. Solamente al alcanzar cierto grado de perfección del pulido, las superficies se acercarán hasta tal punto que las fuerzas de cohesión de las moléculas entrarán en juego. Comenzarán a obstaculizar el desplazamiento de las barras unas respecto a otras, lo



que asegura precisamente la fuerza de rozamiento de reposo. Al deslizar las barras lisas, los enlaces moleculares entre sus superficies se rompen de modo similar a como en las superficies rugosas se destruyen los enlaces dentro de los propios resaltes. La ruptura de los enlaces moleculares es lo fundamental en que las fuerzas de rozamiento se diferencian de las de elasticidad, durante cuya aparición no tiene lugar semejante ruptura. Debido a esta propiedad las fuerzas de rozamiento dependen de la velocidad.

Con frecuencia en los libros de divulgación científica y en los cuentos de ciencia-ficción se representa un mundo sin rozamiento. Este proceder permite mostrar de una forma en sumo grado patente tanto la utilidad, como el perjuicio causado por el rozamiento. Pero no debe olvidarse que la base del rozamiento la forman las fuerzas eléctricas de interacción de las moléculas. La supresión de este fenómeno significaría de hecho la aniquilación de las fuerzas eléctricas y, por consiguiente, la descomposición total e inevitable de la sustancia.

Rozamiento en los líquidos y en los gases

Cuando dos capas vecinas de líquido se mueven una respecto a otra, entre éstas existe un contacto ideal irrealizable durante el contacto de superficies sólidas por muy grande que fuese el esmero con que se efectuó su pulido. Las moléculas de la capa más rápida arrastran en pos suyo las de la más lenta, ya que entre éstas actúa la atracción molecular y, a su vez, retardan por aquéllas. Aquí radica la causa de la viscosidad o del *rozamiento interno* en los líquidos.

Debido a la fluidez del líquido aquí ya no tiene lugar la ruptura de todos los enlaces moleculares, como durante el deslizamiento de las superficies sólidas. Parte de las moléculas "salta" en la dirección de la acción de las fuerzas moleculares. La magnitud del rozamiento es inversamente proporcional a la fluidez del líquido y por su valor es considerablemente inferior al rozamiento seco, a menos que la velocidad relativa de las capas de líquido no sea muy grande*.

En los gases la distancia media entre las moléculas es tan grande que la atracción molecular no puede provocar rozamiento entre las capas de gases que se mueven unas respecto a otras. Si las moléculas no hubieran salido fuera de los límites de estas capas, el rozamiento no existiría. Mas el movimiento térmico lanza las moléculas fuera de las márgenes de las capas. Al pasar de una capa rápida a la lenta, las moléculas durante las colisiones aceleran esta capa,

* Cabe señalar que los procesos físicos operados tanto durante el rozamiento seco, como durante el líquido son extraordinariamente complicados, y hasta la fecha no existe una teoría cuantitativa satisfactoria de estos fenómenos.

mientras que las pertenecientes a la capa lenta, al penetrar en la rápida, la frenan. La aparición de las aceleraciones significa la aparición de las fuerzas. Sin embargo, en los gases las fuerzas de rozamiento son sentenares de veces menores que en los líquidos.

Las fuerzas de nuestros músculos

La gravitación nos aprieta constantemente contra la Tierra y las fuerzas de elasticidad nos sostienen en su superficie. El rozamiento nos da la posibilidad de trasladarse libremente. La tensión superficial nos ayuda a vivir. Todas las fuerzas mencionadas pertenecen al reino de la naturaleza no animada. Podemos gobernar la mayoría de éstas. Sin embargo, estamos en condiciones de hacerlo solamente porque tenemos a nuestro servicio unas fuerzas que se subordinan incondicionalmente al mandato de la razón sin ningún intermediario mecánico. Son las fuerzas de nuestros músculos.

El músculo es uno de los "mecanismos" más admirables creados por la naturaleza. En primer lugar, es una máquina muy económica que utiliza con eficiencia cerca del 45% de la energía química que consume. El rendimiento de los músculos de la tortuga constituye cerca del 80%. Y la más perfecta turbina de vapor tiene el rendimiento no mayor que 40%.

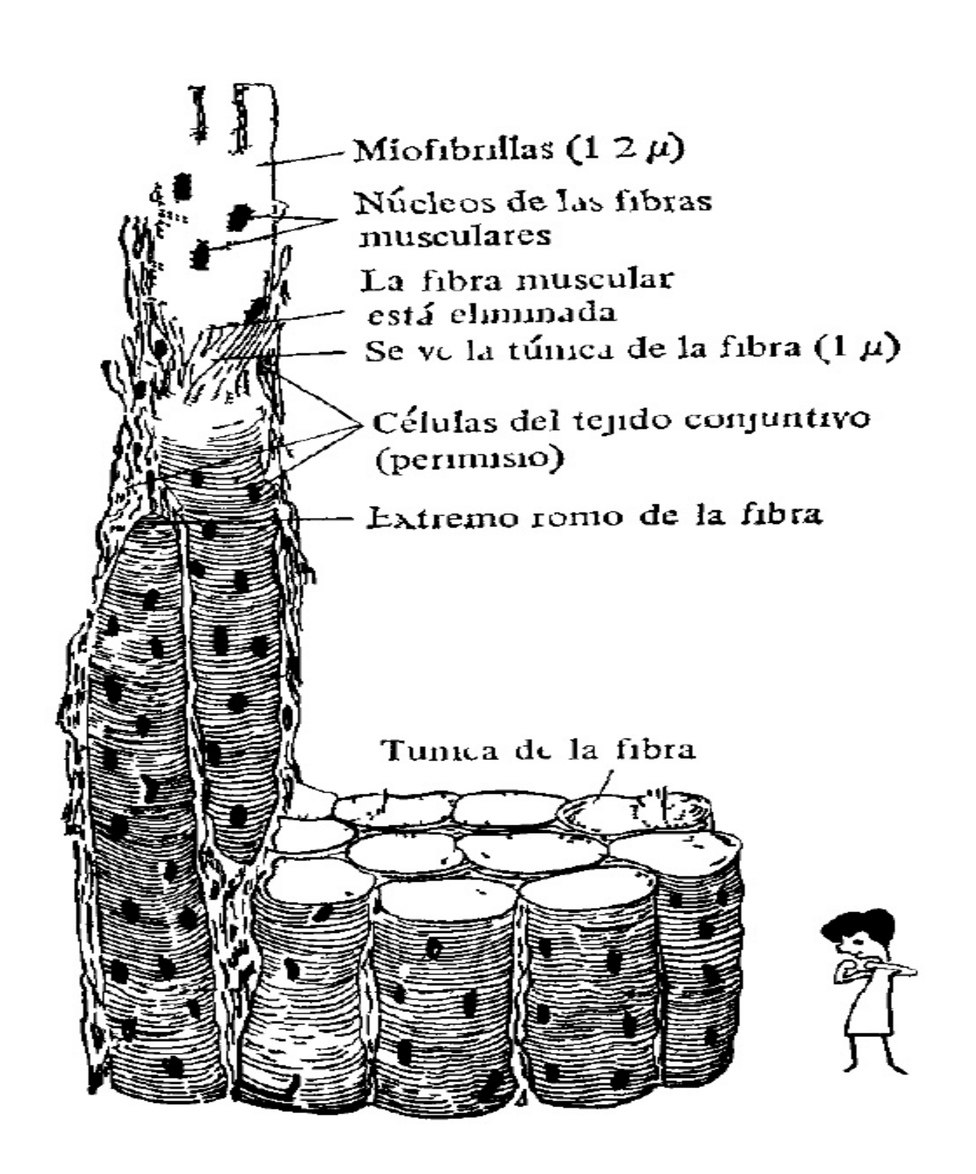
La fuerza desarrollada por un músculo es digna de mayor respeto. Cada persona puede ponerse de puntillas permaneciendo en un pie, incluso con carga. Esto significa que el músculo gastronémico (o sea, de la pantorrilla) es capas de elevar cerca de 100 kilógramos. Y si se tiene en cuenta que la planta no es sino una palanca y el músculo está sujetado al brazo corto de esta

palanca, entonces, obtendremos una cifra todavía más imponente: casi una tonelada. Y todo esto ocurre en las condiciones en que el hombre no puede por su propia voluntad obligar el músculo a contraerse máximamente. Si la regulación por parte del sistema nervioso es alterada y el músculo desarrolla su fuerza total, éste es capaz arrancar un pedazo del hueso al que está adherido.

¡Y la sorprendente capacidad de trabajo del músculo! El miocardio, o sea, el músculo del corazón, realiza su trabajo de día y de noche ininterrumpidamente sin reparación alguna en el curso de muchas decenas de años. Por ahora no hay ninguna máquina creada por el hombre capaz de realizar semejante cosa. El trabajo para crear un corazón artificial está todavía en sus albores.

La base de toda la actividad del músculo la constituyen las transformaciones químicas complejas en el interior de las células. No expondremos todos los problemas que existen aquí y los cuales, a propósito, quedan sin resolver, en lo fundamental, hasta el día de hoy incluso a pesar de los considerables éxitos: en los últimos años cuatro científicos fueron galardonados con el Premio Nobel por los trabajos dedicados al esclarecimiento de la química de los músculos. Nosotros sólo nos referiremos a una cosa: ¿cómo se engendra la fuerza muscular? ¿Qué obliga al músculo a contraerse?

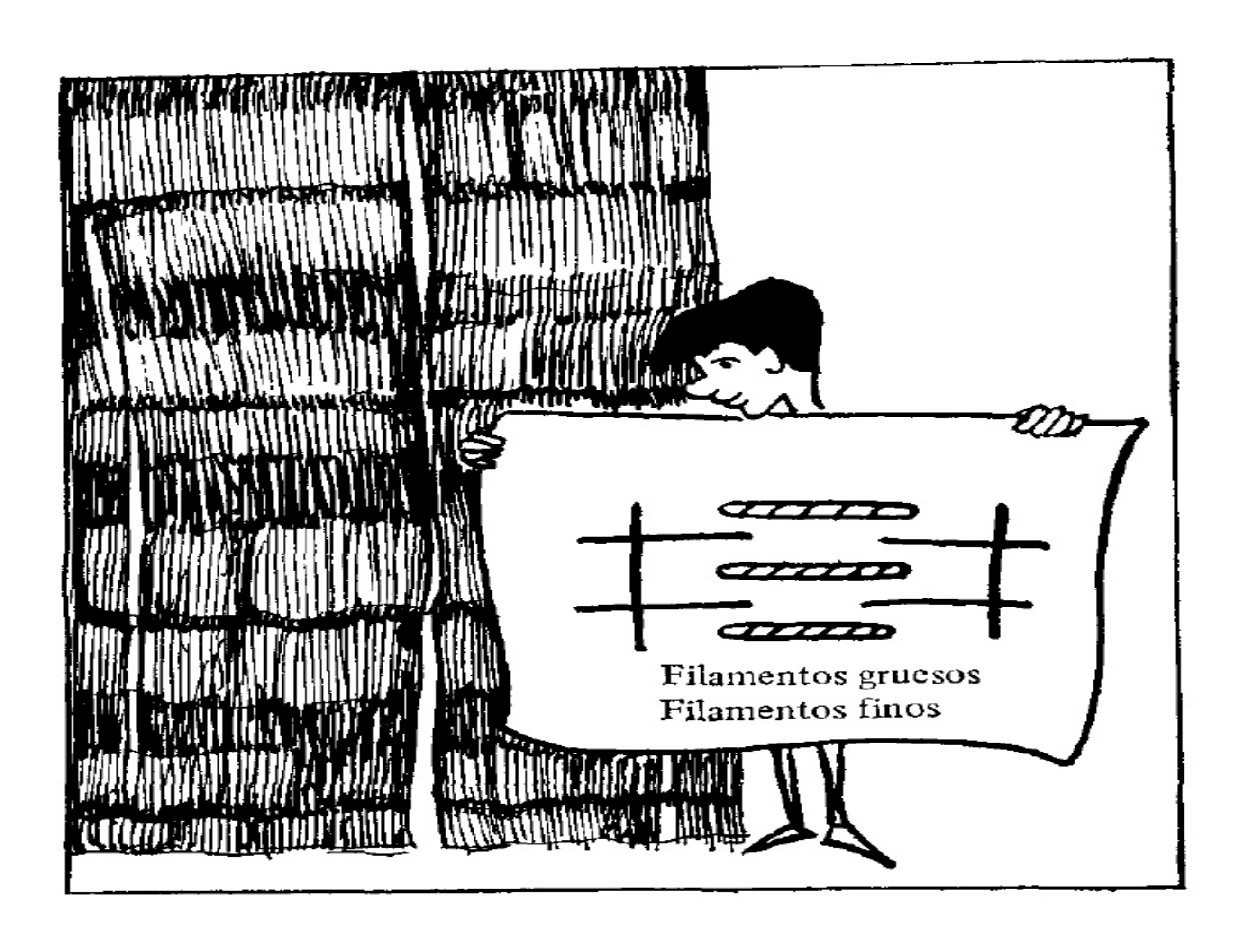
Al cortar un bistec vemos que el músculo tiene estructura fibrosa. Con el microscopio se observan bien miles de fibras musculares: cilindros largos colocados en filas regulares. Cada fibra no es una célula, sino un conjunto de éstas con el citoplasma colectivizado y los núcleos aislados. Las fibras representan unas varitas alargadas llamadas micelas, estructuradas a partir de haces



de moléculas proteínicas, material de construcción principal de los tejidos vivos.

Cada fibra, como demostraron las investigaciones con la ayuda del microscopio electrónico, consta a su vez de 1000 a 2000 y más fibras finas, miofibrillas. Y cada fibrilla está integrada por filamentos proteínicos gruesos y finos. Los filamentos gruesos están formados por la proteína llamada miosina, y los finos, por la actina. En la figura se representa la microfotografía electrónica de una miofibrilla. Los tabiques negros (las llamadas líneas z) dividen la miofibrilla en segmentos aislados, sarcómeros. En la misma fi-

gura se da el esquema de un sarcómero. Los filamentos finos de la actina están adheridos a las líneas z, y los gruesos, están dispuestos en el centro del sarcómero.



Cada filamento grueso consta de 180 a 360 filamentos finos de miosina orientados longitudinalmente: "colas", con prominencias, "cabezas", en los extremos. Las "colas" se disponen formando filamentos paralelamente unas a otras, y las "cabezas" "asoman" por todos los lados del filamento grueso. Las "cabezas" pueden tocar los filamentos de actina formando puentes entre los hilos de miosina y de actina.

Durante la contracción del músculo las líneas z, se mueven al encuentro unas a otras, y los filamentos finos de la actina se deslizan entre

los gruesos de miosina. En ello consiste el modelo deslizante de los músculos establecido por vía experimental con carácter fidedigno.

La principal dificultad radica en explicar cuál es, en fin de cuentas, el mecanismo que conduce al deslizamiento de los filamentos gruesos y finos unos respecto a otros. Aquí todavía no existe una teoría comúnmente admitida. Tal vez, la teoría más interesante sea sugerida recientemente por A. S. Davydov, conocido físico teórico soviético. Relataremos sobre ésta brevemente.

La "cola" de la molécula de miosina es una espiral. La forma espiral de la molécula se mantiene por los enlaces de hidrógeno (puentes) entre los grupos de átomos de las espiras vecinas. La molécula posee tres cadenas lineales de enlaces de este género. De acuerdo con la idea de Davydov, a lo largo de cada cadena pueden propagarse excitaciones longitudinales. Las fuerzas que actúan entre las espiras vecinas no son lineales debido a que la variación de las distancias entre las mismas inducen cambios de los momentos eléctricos dipolares de los grupos de átomos que están en interacción. Como resultado de este carácter no lineal a lo largo de la cadena de los enlaces de hidrógeno puede avanzar el impulso de compresión (o de dilatación) que no modifica su forma. Los impulsos de este tipo se conocen hace mucho tiempo en la teoría no lineal de las oscilaciones y se denominan ondas *solitarias*. En particular, las ondas de tsunami engendradas en el océano durante las erupciones volcánicas o terremotos subterráneos también son ondas solitarias.

Davydov demostró que debido a los enlaces de fuerza sólo a lo largo de dos cadenas de puentes de hidrógeno entre tres pueden propagarse simultáneamente las ondas solitarias. Por esta

causa la *molécula de miosina se torsiona y esta* torcedura se traslada a lo largo de la molécula a la velocidad de la onda solitaria. Las "cabezas" de las moléculas de miosina, en este caso, entran en contacto con los filamentos de actina formando puentes. Por parte de los puentes sobre los filamentos de actina adheridos a los tabiques *z*, actúa una fuerza. Es cierta especie de fuerza química (y por consiguiente, electromagnética). Ésta puede considerarse análoga a la fuerza de rozamiento. De conformidad con la *tercera ley de Newton, sobre el filamento grueso* por parte del puente actúa una fuerza dirigida en el sentido opuesto al del movimiento de las ondas solitarias. Debido a ello el filamento de miosina se mueve entre los de actina similarmente a una serpiente que se desliza a través de un tubo.

Precisamente el deslizamiento de los filamentos unos respecto a otros a la contracción del músculo.

Pero ¿de qué modo, en fin de cuentas, nuestro deseo de volver la página del libro origina el movimiento de las ondas solitarias en los filamentos de miosina? El lector no encontrará respuesta a esta pregunta en nuestro libro. Y, por ahora no la encontrará tampoco en ningún otro. La compleja cadena de los procesos que se operan aquí está lejos de rastrearse en todos sus eslabones.

4. Cargas y corrientes libres en la naturaleza

Partículas cargadas por encima de nosotros y en nuestro derredor

El estado natural de los cuerpos en la superficie de la Tierra tanto de los átomos y moléculas, como de grandes pedazos de sustancia, es

la neutralidad eléctrica. Sin embargo, si se carga un electroscopio, dentro de cierto lapso éste perderá toda la carga, por muy cuidadoso que sea el aislamiento. Esto significa que el aire alrededor de nosotros contiene una cantidad bastante grande de partículas cargadas: de iones y de partículas de polvo. La bolita del electroscopio "chupa" a partir de la atmósfera iones de signo opuesto, transformándose en neutro.

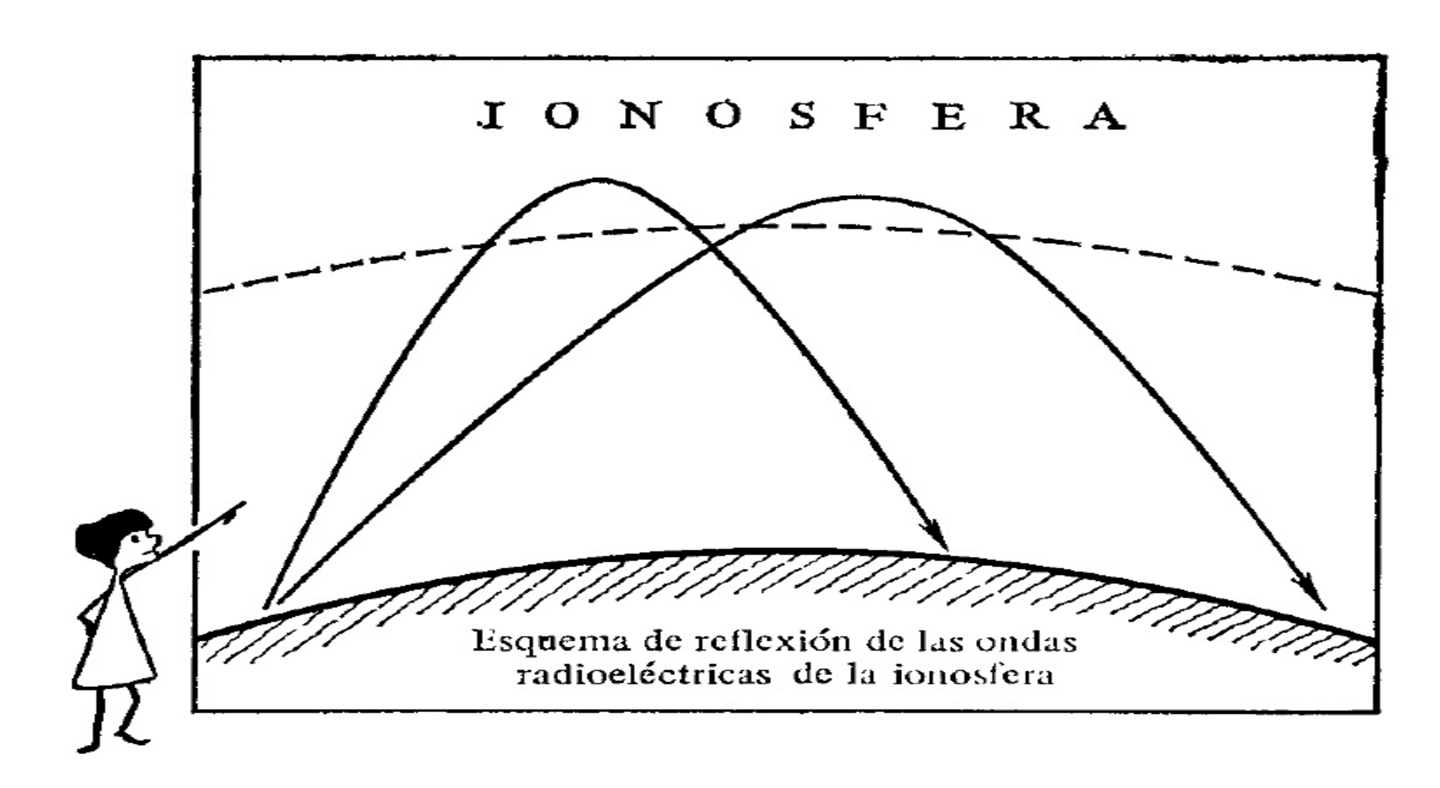
En la altitud por encima de nosotros se extiende una capa gruesa de gas fuertemente ionizado: la ionosfera. Ésta comienza a varias decenas de kilómetros sobre la superficie de la Tierra y llega a la altura de cuatrocientos kilómetros. No se puede detectarla con el electroscopio. Para descubrir la ionosfera se necesitó la invención de la radio. La capa de gas fuertemente ionizado conduce bien la corriente eléctrica y a semejanza de la superficie metálica refleja las ondas hertzianas cuya longitud supera 30 metros. De no existir el "espejo" ionosférico, la radiocomunicación en ondas cortas sería posible tan sólo dentro de los límites de visibilidad directa.

Tres abastecedores

Así pues, alrededor de nosotros y por encima de nosotros existen iones. Pero su vida es corta. Un encuentro casual de dos iones de signos opuestos, y éstos ya dejan de existir. Por lo tanto, deben haber unos procesos de acción continua que aseguren el suministro de iones.

Tenemos hasta tres de estos abastecedores. Junto a la superficie de la Tierra es la radiación de los elementos radiactivos contenidos en la corteza terrestre en cantidades pequeñas. A grandes alturas es la radiación ultravioleta del Sol. Y, finalmente, todo el espesor de la atmósfera, de arriba abajo, lo atraviesan los flujos de partí-

culas cargadas muy rápidas: son los rayos cósmicos. Una parte pequeña de éstos viene del Sol, y los demás, de las profundidades del espacio cósmico de nuestra Galaxia.



Esquema de reflexión de las ondas radioeléctricas de la ionosfera

A veces, de la superficie del Sol arrancan flujos de partículas cargadas de potencia extraordinaria. A la altura de varios centenares de kilómetros sobre la superficie de la Tierra sus campos electromagnéticos excitan los átomos obligándoles a emitir luz. Entonces vemos la aurora boreal. Este fenómeno se produce preferentemente en las latitudes altas, y los residentes en las zonas templadas casi nunca tienen la ocasión de gozar del juego de colores —de belleza indescriptible— de las columnas luminosas tornasoladas.

El relámpago

Todo el mundo, sin embargo, conoce la descarga del relámpago. Una acumulación enorme

de electricidad de un mismo signo en la nube da lugar a la aparición de una chispa cuya longitud supera, a veces, decenas de kilómetros. Torciendo caprichosamente su camino, según sea la conductibilidad del aire, el relámpago (el rayo) produce con frecuencia efectos sorprendentes. Los más admirables entre éstos se mencionan en el libro "Atmósfera" perteneciente a la pluma del astrónomo francés Flammarion.

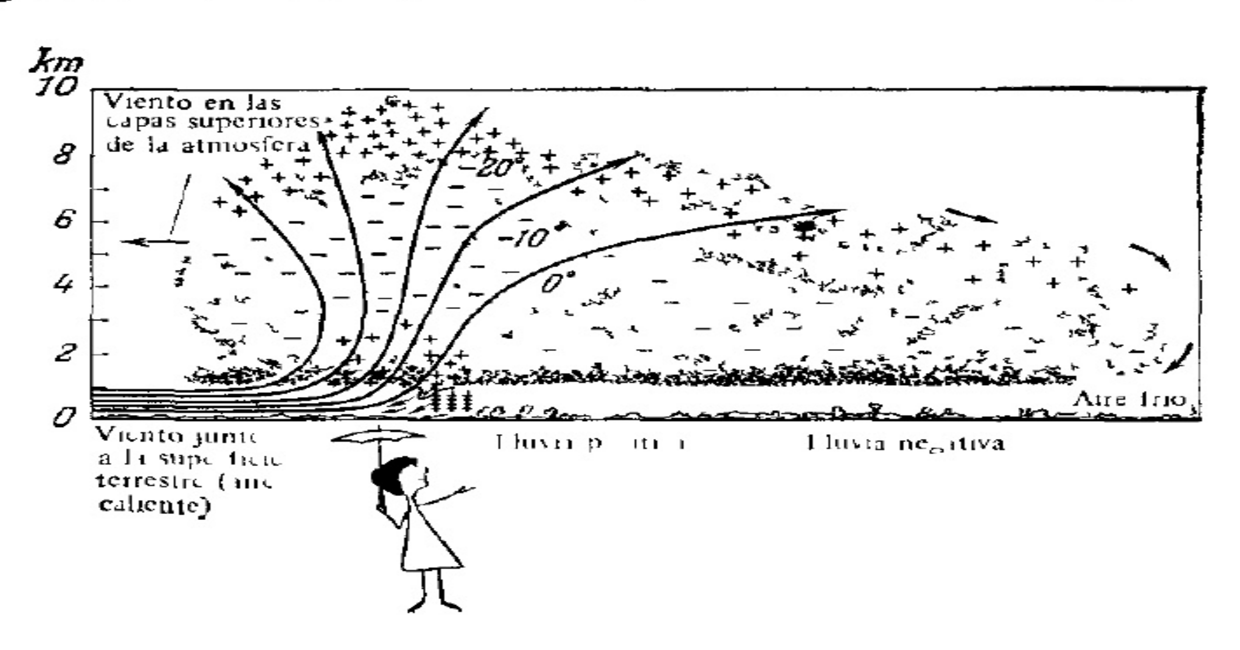
"Ninguna obra teatral, ningún truco —escribe Flammarion— puede rivalizar con el relámpago en cuanto a lo inesperado y extraño de sus efectos. Parece ser una materia especial, algo promedio entre las fuerzas inconscientes de la naturaleza y el alma consciente del hombre; es algo como un espíritu *sui géneris*, sutil y caprichoso, astuto y al mismo tiempo estúpido, clarividente o ciego, que posee voluntad y sumiso, que pasa de un extremo a otro, espantoso e inconcebible. Es imposible entenderse con él ni captarlo. Solamente *actúa*, y nada más. Sus actuaciones, sin duda, al igual que las nuestras, tan sólo parecen antojosas, pero en la realidad están sujetas a ciertas leyes inmutables. No obstante, hasta la fecha no podíamos captar estas leyes. En un lugar este espíritu mata de golpe y quema al hombre, al tiempo que no sólo evita estropear, sin tocarla quisiera, su vestimenta, sino además la conserva intacta. En otro lugar desviste al hombre, dejándolo desnudo, sin causarle el menor daño, ni siquiera un rasguño. Hay lugares donde roba monedas ingeniándoselas para no causar daño ni al monedero ni al bolsillo. Ora quita el dorado de la araña y lo traslada al enlucido de las paredes; ora descalza al caminante tirando sus zapatos a diez metros al lado; ora, por fin, en un poblado perfora, en el mismo centro, una pila de platos,

con la particularidad de que lo hace alternativamente, de a dos ... ¡Qué orden puede establecerse aquí!"

Seguidamente se enumera cerca de un centenar de diferentes casos. Por ejemplo "He aquí lo que pasó a un hombre muy velludo; la tormenta lo sorprendió cerca de E., el rayo le cortó el pelo en bandas a lo largo de todo el cuerpo, lo arrolló en ovillos, introduciéndolos profundamente en los músculos de las pantorrillas". Citemos otro caso: "En verano de 1865 un médico de los alrededores de Viena, el doctor Drendinger, regresaba a casa después de viajar por el ferrocarril. Al salir del coche notó la falta de su portamonedas; resultó que se lo robaron.

Este portamonedas era de carey y en una de sus tapas se encontraba incrustado el monograma de acero del doctor: dos letras D entrelazadas.

Al pasar cierto tiempo el médico fue llamado a examinar a un extranjero "batido" por el rayo y encontrado sin sentido bajo un árbol. Lo primero que vio el médico en el muslo del herido fue su propio monograma que tenía un aspecto tal como si lo acabaran de fotografiar.



¡Figúrense el asombro del médico! Al enfermo lo hicieron volver en sí y lo trasladaron al hospital. Allí el médico declaró que en los bolsillos del afectado, en algún lugar, debía encontrarse su portamonedas de carey, lo que resultó completamente justo. El sujeto este era aquel mismo ladrón que había robado el portamonedas, y la electricidad lo estigmatizó, fundiendo el monograma metálico."

Es curioso que en la estadística citada por Flammarion el número de mujeres muertas sea casi tres veces menor que el de hombres. Este hecho se explica, claro está, no por la gentileza del relámpago, sino, meramente, porque en aquella época (principios del siglo XX) en Francia los hombres estaban ocupados con mayor frecuencia, en los trabajos de campo.

Hace poco, en los periódicos norteamericanos se ha hecho mención de un caso digno de Flammarion. El rayo cayó en una nevera y dejó en ésta frito a un pollo, el cual, después, con buena suerte se enfrió, ya que la nevera quedó en buen estado.

Por supuesto, se puede poner en tela de juicio la veracidad de todos casos mencionados, pero no se puede dejar de consentir que el relámpago, efectivamente, es capaz de hacer maravillas. No siempre es posible explicarlas. La descarga dura tan sólo cerca de una cienmilésima fracción de segundo y en estos casos tan excepcionales no suele haber preparación alguna para su observación. Y es imposible volver a repetir después este acontecimiento, por cuanto no se puede crear un rayo absolutamente idéntico al primero, sin hablar ya de otras condiciones.

Sin embargo, de principio todo aquello no es hasta tal punto misterioso como se figuraba Flammarion. Al fin y al cabo, todo se reduce a las acciones de la corriente tan acostumbradas como

el calentamiento, el campo electromagnético y las reaciones químicas. Lo único insólito es la enormidad de la corriente: decenas y hasta centenares de miles de amperios.

Lo principal no consiste en penetrar en la esencia de los innumerables casos curiosos. Es necesario comprender de qué modo en la nube ceráunea se acumula la carga eléctrica. ¿Qué es lo que origina la electrización de las gotas de agua y por qué las cargas de signo contrario están separadas espacialmente dentro de la nube? Aquí muchas cosas distan todavía de estar claras hasta el final.

En primer término, no hay un mecanismo único de carga de las gotas.

Se conocen con carácter fidedigno varios de estos mecanismos y es difícil evaluar cuál de los mismos desempeña el papel principal. He aquí dos de éstos. En el campo eléctrico de la Tierra (ya hemos mencionado que el globo terráqueo está cargado negativamente) la gota de agua se polariza. En su parte inferior se acumula la carga positiva, y en la superior, la negativa. Una gota grande en su caída capta preferentemente iones negativos del aire y adquiere carga eléctrica. Los iones positivos se arrastran hacia arriba por el flujo ascendente de aire.

Otro mecanismo es la carga de las gotas al fraccionarse éstas por los flujos de aire que van a su encuentro. Las salpicaduras pequeñas se cargan negativamente y se arrastran hacia arriba, mientras que las grandes, de carga positiva, caen en dirección a la superficie.

Estos dos mecanismos aseguran tanto la carga de las gotas, como la separación espacial de las cargas de signo contrario en el interior de la nube. De ordinario, en la parte inferior de la nube ceráunea se acumula la carga negativa (a

excepción de una pequeña zona cargada positivamente) y en la superior, la positiva.

Los asuntos toman un cariz mucho peor cuando se trata de la explicación del relámpago en bola (relámpago esférico) que, a veces, hace su aparición de una descarga fuerte del rayo lineal. Habitualmente es una bola luminosa de 10 a 20 centímetros de diámetro. Con frecuencia el relámpago esférico recuerda a un "gatito de medio tamaño, arrollado en un ovillo que rueda sin la ayuda de los pies". Al tocar los objetos el relámpago esférico puede estallar causando considerables destrucciones.

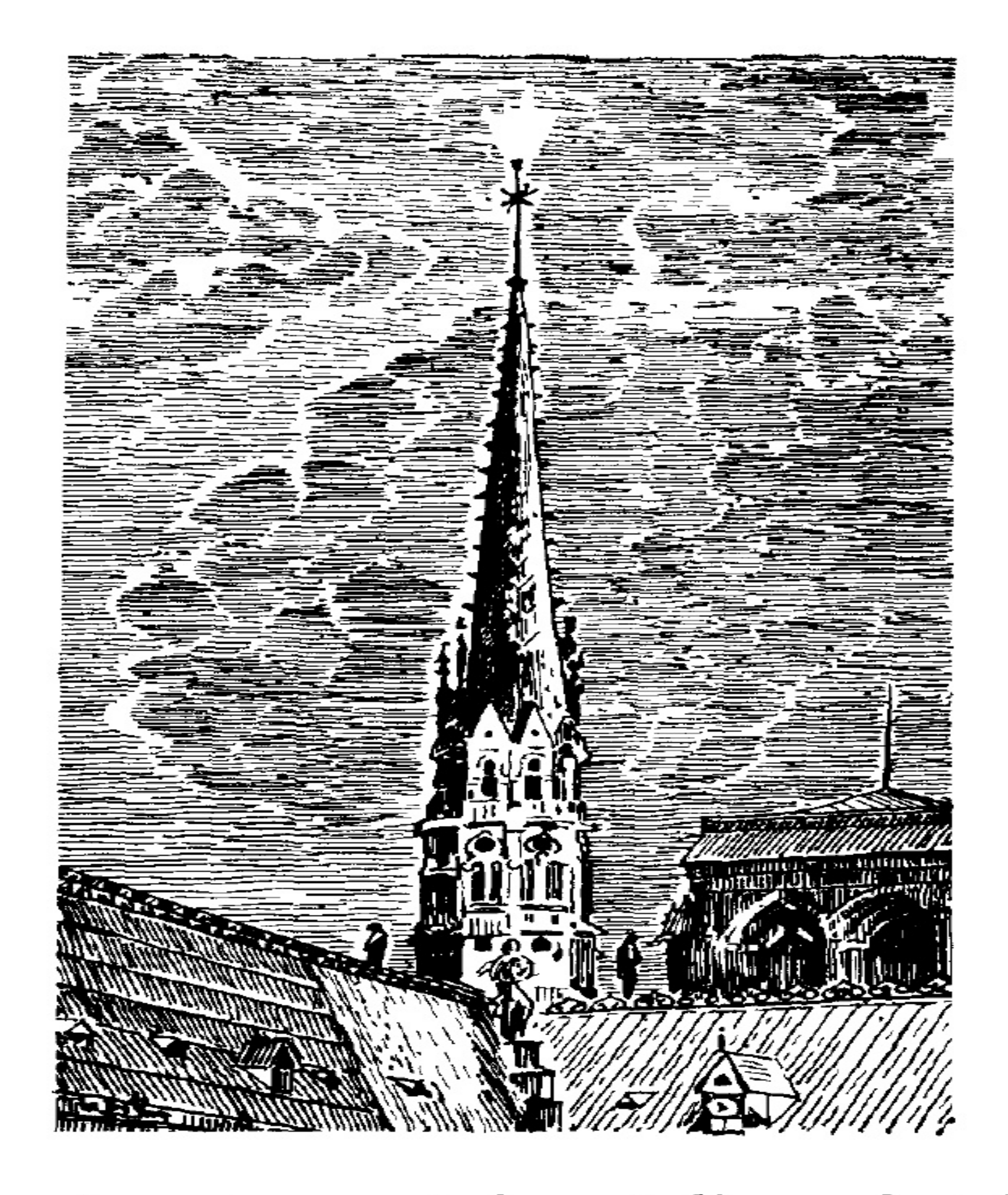
El relámpago esférico es, tal vez, el único fenómeno macroscópico en la Tierra que hasta la fecha no tiene una explicación fidedigna. En los laboratorios no se logra obtener una descarga de tipo esférico. He aquí donde radica el quid de la cuestión.

Fuego de San Telmo

Antes de que estalle la tormenta o durante ésta en las puntas y en los ángulos agudos de los objetos subidos a grandes alturas, con frecuencia comienzan a fulgurar conos de luz parecidos a penachos. Esta descarga que transcurre lenta y pacíficamente desde los tiempos remotos lleva el nombre de fuego de San Telmo.

Ya en los trabajos de Tito Livio se podía leer que cuando la flota de Lisandro abandonaba el puerto para atacar a los atenienses, en los mástiles de la galera del almirante se encendieron fuegos. Los antiguos consideraban que la aparición del fuego de San Telmo es un buen augurio.

Los que con mayor frecuencia se hacen testigos de este fenómeno son los alpinistas. En ocasiones, no sólo los objetos metálicos, sino



incluso los extremos de los cabellos en la cabeza se adornan de pequeños penachos luminosos. Y si se alza la mano, por el escozor característico, se experimenta la sensación de cómo de los dedos emana la corriente eléctrica. Muchas veces los pioletes comienzan a zumbir a semejanza de grandes abejorros.

El fuego de San Telmo no es sino una forma de descarga por corona que puede obtenerse fácilmente en el laboratorio. La nube cargada induce en la superficie de la Tierra, debajo de sí

misma, cargas eléctricas de signo contrario. Una carga especialmente grande se acumula en las puntas. Cuando la intensidad del campo eléctrico alcanza el valor crítico de 3 000 000 V/m, comienza la descarga. Los electrones formados junto a la punta debido a la ionización ordinaria del aire se aceleran por el campo y, al chocar contra los átomos y moléculas, los destruyen. El número de electrones e iones crece en avalancha, y el aire se torna luminoso.

Carga eléctrica de la Tierra

La nube de tormenta poco tiempo conserva su carga. Varios golpes del rayo, y la nube se descarga. La carga del globo terráqueo, si no se presta atención a fluctuaciones insignificantes, queda invariable. Junto a la superficie terrestre el campo eléctrico no es tan pequeño como se puede pensar: es de 130 V/m. A primera vista esto parece bastante extraño. Debido a los iones atmosféricos el aire conduce la corriente eléctrica, y los cálculos demuestran que en media hora, aproximadamente, el globo terráqueo tiene que descargarse por completo. Por esta razón la dificultad principal consiste no en aclarar la procedencia de la carga, sino en comprender por qué ésta no desaparece.

Existen dos causas que motivan el restablecimiento de la carga de la Tierra. En primer lugar, los golpes de los relámpagos. Durante 24 horas en la Tierra se estallan más de 40 mil tormentas y cada segundo en la Tierra caen cerca de 1800 relámpagos. La parte inferior de la nube lleva carga negativa y, en consecuencia, la caída de un rayo es la transmisión al globo terráqueo de cierta porción de electricidad negativa.

Simultáneamente, durante la tormenta se engendran corrientes que fluyen desde numerosos objetos terminados en punta (el fuego de San Telmo) y que derivan de la superficie terrestre la carga positiva.

Aquí es difícil hacer el balance, pero, por lo visto, en general los "cabos se ajuntan". La pérdida de la carga negativa por los sectores de la superficie terrestre sobre los cuales se extiende el cielo despejado se compensa por la afluencia de cargas negativas en los lugares donde se desenfrenan las tormentas.

Pero, ¿de dónde sacó la Tierra su carga y por qué ésta es negativa? Aquí sólo se puede hacer conjeturas. Según la idea de Frenkel, al principio una carga insignificante se engendró por causas fortuitas. Luego, la carga comenzó a crecer a costa del "mecanismo de la tormenta" —que hemos mencionado ya— hasta que se haya establecido el equilibrio dinámico existente hasta el día de hoy.

Primeramente, la carga habría podido ser positiva. En tal caso, la polarización de las gotas de agua de la nube ceráunea habría sido otra y los rayos habrían transmitido a la Tierra una carga positiva. En general, todo habría sido tal como lo es en la actualidad, con la única diferencia de que se habrían alternado los papeles de las cargas positivas y negativas.

Magnetismo terrestre

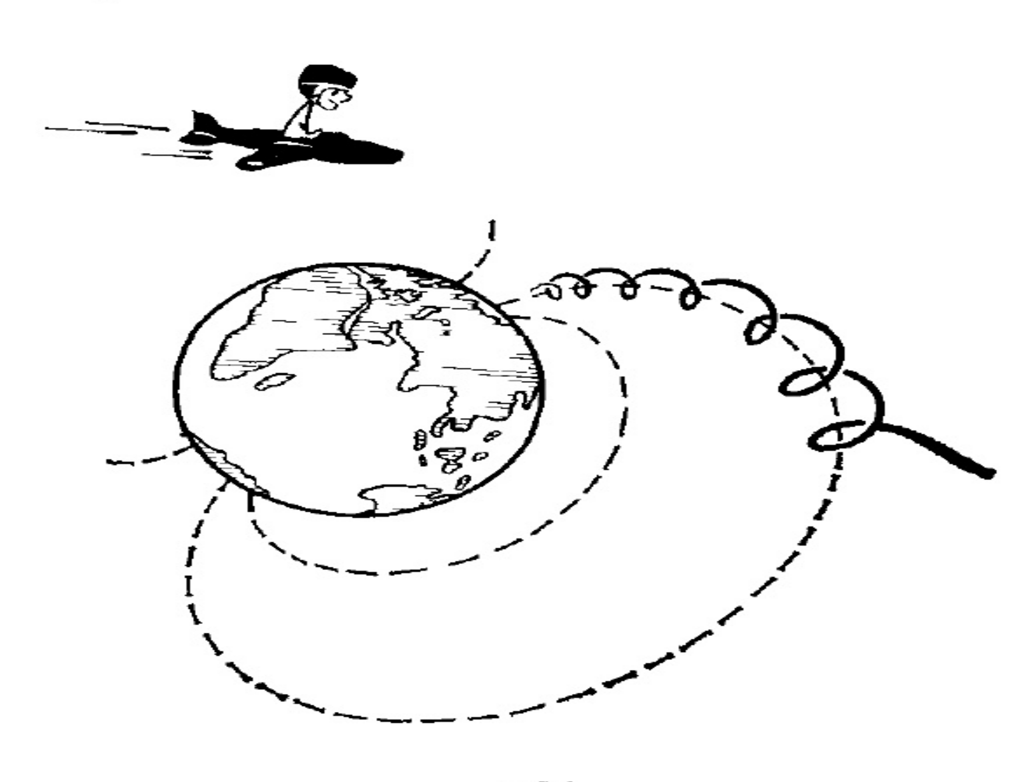
El campo magnético de la Tierra atrajo la atención de los hombres mucho antes que el eléctrico. Aquel campo se descubre muy sencillamente, pero su papel en la vida de nuestro planeta está muy lejos de reducirse a ayudar a sus habitantes a encontrar, valiéndose de la

brújula, el justo derrotero en el inmenso océano, en la taiga o en el desierto.

Si bien el campo eléctrico, en la práctica, no sale fuera de los límites de las capas inferiores de la atmósfera, el campo magnético, en cambio, se extiende a 20 ó 25 radios terrestres. Solamente a la altura de 100 000 kilómetros el mismo deja de desempeñar un papel notorio, acercándose al valor del campo del espacio interplanetario.

El campo magnético forma la tercera "faja blindada" que rodea la Tierra a la par de la atmósfera y la ionosfera. Dicho campo no deja aproximarse a la Tierra los flujos de partículas cósmicas, a menos que su energía sea demasiado grande. Tan sólo en la zona de los polos magnéticos estas partículas pueden irrumpir sin obstáculos en la atmósfera.

A grandes alturas el campo magnético no es considerable, pero, abarca regiones enormes del espacio. Debido a la acción larga del campo magnético la partícula cargada varía notoriamente su trayectoria. En vez de una línea recta se



produce una espiral que se arrolla en las líneas de fuerza del campo. A lo largo de las líneas de fuerza el campo magnético empuja las partículas hacia los polos. Por cierto, a veces, si la velocidad de la partícula es grande, ésta no no tiene tiempo siquiera para describir una sola espira; en este caso sólo se puede hablar sobre la curvatura de la trayectoria.

De conformidad con la ley de Ampère, sobre la partícula que vuela a lo largo de la línea de fuerza el campo magnético no ejerce influencia. Ésta es la razón por la cual las partículas están en condiciones de acercarse libremente a los polos de donde divergen en abanico las líneas de fuerza. No es de extrañar, pues, que los flujos corpusculares provenientes del Sol, provocan la luminiscencia de las capas superiores del océano aéreo, por exelencia, junto a los polos.

A propósito, estos flujos de partículas de por sí crean campos magnéticos considerables, "tempestades magnéticas" durante las cuales la aguja de la brújula comienza a agitarse desahuciadamente, sin rumbo ni dirección. Los cinturones de radiación de la Tierra descubiertos relativamente hace poco con la ayuda de los cohetes cósmicos no son sino partículas cargadas de energías no muy grandes capturadas por la trampa magnética tendida por nuestro planeta. Precisamente el campo magnético retiene a gran altura los enjambres de partículas cargadas que rodean la Tierra similarmente a una aureola. En el cinturón externo predominan los electrones, y en el interno, donde la intensidad del campo es mayor, lo hacen los protones. Estos cinturones representan un peligro real para los vuelos de los cosmonautas.

Los primeros intentos de explicar el magnetismo de la Tierra se remontan a la segunda mitad del siglo XVII, cuando William Gilbert conjeturó

que la Tierra es un gran imán permanente. Lo condujo a esta conjetura la investigación de los imanes esféricos. "Un imán confeccionado de este modo —escribió él— se asemeja certera y perfectamente a la Tierra".

En efecto, la "semejanza" existe, aunque dista mucho de ser tan completa como pareció al principio. Ahora estamos al tanto de que el campo magnético de la Tierra no es permanente, que no sólo está sujeto a variaciones, sino también a inversiones totales de la dirección del campo. Ni siquiera la posición de los polos magnéticos es invariable, ni mucho menos. Por lo demás, incluso en el caso de no saber estas cosas, la hipótesis de Gilbert, igualmente tendría que ser rechazada: las temperaturas en las profundidades de la Tierra son tan elevadas que cualquier imán permanente debería "desmagnetizarse".

En 1919 Larmor enunció una idea nueva de principio: el magnetismo del Sol (más tarde esta idea fue extendida a la Tierra y a otros cuerpos celestes) está relacionado con el fenómeno de la inducción electromagnética. La idea en cuestión formó la base de los "modelos de dínamo" más populares actualmente, el comienzo de cuyo desarrollo en la Unión Soviética está vinculado con el nombre de Ya. I. Frenkel. El término "dínamo", o bien, "dínamo hidromagnético" viene justificado por una analogía profunda: en el devanado del rotor de una dínamo se genera la corriente (y, por consiguiente, también el campo magnético) debido al movimiento de los hilos de este devanado; generación análoga, es decir, intensificación del campo magnético, es posible como resultado de los movimientos relativos de las partes conductoras internas de los planetas y las estrellas. El primer problema consiste en averiguar cuáles deben ser estos movimientos internos para que la generación se realice efec-

tivamente; esto constituye el contenido de los modelos de "dínamo cinemático". Pero se da, además, otro problema más difícil: sobre las causas de estos movimientos, en particular, sobre los manantiales de energía. En este ámbito, por ahora, muchas cuestiones siguen todavía sin aclarar. La aparición y el desarrollo de los modelos de "dínamo hicieron una gran aportación a la comprensión de la naturaleza y de las particularidades de los campos magnéticos de los planetas y las estrellas. Sin embargo, además de los "efectos de dínamo" se deben tomar en consideración también otros efectos...

"Espera —interrumpe aquí un autor (el Reacio, según la característica de la pág. 300) al otro— ¿qué? ¿te propones a escribir sobre vuestra teoría "familiar"? Pero es que ésta todavía no..." "Sí —le corta el segundo (el Manso, según la misma página)— todavía no ha ganado el común reconocimiento. Sin embargo, es interesante cómo la acogerá el lector".

Así, pues, "otros efectos". Las fuerzas gravitacionales tratan de comprimir la sustancia de los planetas. A esto se opone la repulsión de las envolturas electrónicas periféricas de los átomos que intervienen durante las compresiones como cierto "esqueleto rígido". Ahora bien, los núcleos de los átomos y las envolturas internas, por acción de la gravitación, se desplazan un poco con respecto a este esqueleto, apareciendo la polarización. Los dipolos eléctricos surgidos, debido a la rotación de los planetas, engendran campos magnéticos. Para mantener estos campos no se necesita consumo de energía. Reviste interés el hecho de que la distribución de los campos resulta dependiente de la composición y la distribución de la sustancia en el planeta de los movimientos internos y hasta de las fuerzas de las mareas... A propósito, el campo eléctrico

también es sensible a esta polarización. Las evaluaciones demuestran que los efectos "hidromagnéticos" y "polarizadores", completando unos a otros, pueden determinar los campos magnéticos del Sol, de la Tierra, de Júpiter y de otros planetas.

Electrodinámica cósmica

Al comenzar la conversación acerca de los campos magnéticos de los planetas y las estrellas hemos entrado inadvertidamente en una nueva región, la de electrodinámica cósmica. En este ámbito hay todavía pocas cosas definidas, mucho menor que distintas hipótesis. No obstante, mucho aquello que todavía ayer figuró como conjetura curiosa, hoy llega a ser casi un hecho fidedigno. Y lo primordial reside en que se aclaró que las fuerzas electromagnéticas desempeñan en el cosmos un papel bastante importante, y no pequeño, como se suponía antes.

La superficie enfurecida y la atmósfera del Sol... Lenguas gigantescas de materia incandescente arrancando hacia las alturas. Torbellinos y trombas de tamaño de nuestro planeta. Tormentas, tormentas incesantes, pero ígneas, resplandecientes. Tormentas no sólo de la materia, sino también del campo magnético.

De vez en cuando, a partir de las profundidades del Sol emergen por parejas manchas negras. El campo magnético en estas zonas incrementa miles de veces.

Fuerzas enormes arrojan, a veces, del Sol coágulos enteros de partículos cargadas. Y éstas, venciendo la atracción gravitacional, a una velocidad de varios mil kilómetros por segundo irrumpen en la atmósfera de la Tierra.

Al físico le es difícil hallar aquí una regularidad y un orden, cualesquiera que sean. Le es

difícil formar una idea acerca de la naturaleza de las fuerzas en este vórtice de sustancia. Téngase, además, en cuenta que todo ello se desarrolla lejos, muy lejos, y no guarda parecido alguno con aquello que podemos observar en nuestro planeta.

Sí, es difícil, pero no imposible. A las temperaturas existentes en el Sol no puede haber ni átomos neutros ni moléculas neutras. Simplemente no pueden quedar intactos, como no puede salir indemne una locomotora que a plena velocidad se estrella contra el tren que va a su encuentro.

Y semejante gas totalmente ionizado, o, como dicen los físicos, el plasma totalmente ionizado, conduce a la perfección la corriente eléctrica. Esta circunstancia ofrece a las fuerzas electromagnéticas la posibilidad de cobrar plena envergadura demostrando su poderío en un nuevo terreno.

En el campo magnético, en el seno del plasma de alta temperatura que está en movimiento, se excitan corrientes eléctricas de considerable valor. Debido a la buena conductividad no se ven propensas a extinguir. A raíz de ello, en el medio, a la par de fuerzas de elasticidad ordinarias adquieren no menor importancia las de interacción magnética de las corrientes. Y si el movimiento de un medio simple se describe con la ayuda de las leyes de hidrodinámica, aquí reina la hidrodinámica magnética.

Por supuesto, estamos todavía muy lejos de comprender todo lo que ocurre en el Sol. Sin embargo, existe la seguridad de que los fenómenos principales, comenzando por la expulsión de masas enteras de materia y terminando con la aparición de manchas solares, se deben a las interacciones magnéticas.

¡Y no solamente esto! El gas interestelar está

ionizado fuertemente por la radiación. Su densidad es pequeña (1 partícula por centímentro cúbico) pero este factor se compensa por las colosales dimensiones de las nubes. Y no se puede dejar de tomar en consideración las corrientes eléctricas y, en correspondencia, los campos magnéticos presentes en éstas.

Las nubes en movimiento llenan toda la Galaxia y por eso ésta se ve penetrada por completo de campo magnético. Y no solamente la propia Galaxia, sino también las regiones aledañas del espacio.

Aquí los campos magnéticos no son grandes y no somos capaces de percibirlos directamente. ¡Pero sabemos que sí existen! ¿De dónde sacamos este conocimiento?

Radioemisión de la Galaxia y los rayos cósmicos

Si hubiéramos podido ver las ondas radioeléctricas, entonces, en el cielo resplandecerían no uno sino nada más que tres Soles (o, más exactamente, "radiosoles"). Uno de éstos correspondería a la constelación de Casiopea, otro, a la del Cisne y, por fin, se trataría de nuestro entrañable Sol*. Pero, además, divisaríamos una multitud de "radiosoles" menos brillantes, así como una débil "radioluz" difusa que llegaría a nuestro planeta de todos los rincones de la Galaxia e, incluso, de los sitios al parecer vacíos adyacentes a ésta.

Una parte de las ondas radioeléctricas se origina durante las colisiones de las partículas cargadas del gas incandescente. Es una radiación

* El Sol es una estrella común y corriente y sólo su proximidad hacia nosotros le permite competir por la "radiobrillantez" con dos primeras fuentes inconmensurablemente más potentes que nuestro Astro.

térmica (radiación de deceleración), y no puede contarnos nada acerca de los campos magnéticos de la Galaxia. Sin embargo, también se da otra parte, no térmica, de cuya cuna sirve el campo magnético. Éste hace virar los rápidos electrones cósmicos, y, girando por una espiral, dichos electrones emiten ondas electromagnéticas (radiación sincrotrónica), a semejanza de como una piedra de afilar, en su furiosa rotación, desparrama chispas a su alrededor, si su superficie se toca con el filo de la navaja. Se puede afirmar que en aquel lugar donde nacen las ondas radioeléctricas ¡obligatoriamente existen campos magnéticos!

Pero ¿de dónde surgen en el cosmos los electrones rápidos? La radioemisión es engendrada por ellos, y en los puntos en que se encuentran fuentes particularmente potentes de ondas radioeléctricas, en estos puntos hemos de buscar los aceleradores cósmicos. Por consiguiente, aquellos lejanos y potentes "radiosoles" que acabamos de mencionar intervienen principalmente como estos aceleradores cósmicos.

Estamos acostumbrados a la tranquila profundidad del despejado cielo nocturno. No hay otra cosa que parezca tan inconmovible y eterna como el "armonioso coro" de los astros celestes. Hablando en general, resulta que así es. Pero a veces ocurren catástrofes; catástrofes de escala puramente cósmica. Una estrella que durante miles de millones de años vivió sin novedad, de pronto, por causas no del todo claras, comienza a hincharse monstruosamente. (Si algo semejante hubiera ocurrido a nuestro Sol*, muy pronto las órbitas de todos los planetas habrían ido a parar dentro de éste). El brillo de la estrella

* En la realidad, semejante explosión no amenaza al Sol. Su masa es demasiado pequeña.

(ésta recibe el nombre de supernova) aumenta centenares de millones de veces, y se la puede ver en el cielo en pleno día. Paulatinamente el brillo disminuye, y en el lugar donde se encontraba la estrella queda una nube difusa que, a veces, se distingue con dificultad con el telescopio. En la Galaxia con miles de millones de estrellas un estallido de este tipo se observa una vez por cada 100 ó 200 años. Desde los tiempos en que fue inventado el telescopio no apareció ni una sola supernova.

Así, pues, los "radiosoles" en su mayoría son residuos de las estrellas supernovas. Sin embargo, se observan huellas de cataclismos todavía más potentes: explosiones de galaxias enteras o de sus núcleos. Estas galaxias que irradian una cantidad enorme de energía en el diapasón de las ondas radioeléctricas recibieron el nombre de *radiogalaxias*. Una de éstas está situada en la dirección de la constelación del Cisne.

Se puede figurar que las partículas cargadas (los electrones), los protones y los núcleos de los átomos) obtienen la aceleración inicial desde una gigantesca onda de choque que acompaña la explosión de la supernova. Seguidamente comienzan a actuar las fuerzas electromagnéticas. Los campos magnéticos crecientes inducen el campo eléctrico. Este campo puede ser no muy grande, mas debido a sus dimensiones cósmicas acelera distintas partículas hasta energías inaccesibles por ahora a los aceleradores creados por las manos del hombre. De acuerdo con las ideas modernas, de fuentes principales de los rayos cósmicos sirven los estallidos de las supernovas.

Cierta parte de los rayos cósmicos la suministran los campos eléctricos de inducción menos potentes del Sol y de otras estrellas.

Los campos magnéticos desordenados de la

Galaxia dispersan las partículas cósmicas. Como resultado, dichas partículas llegan a la Tierra de modo uniforme por todos los lados, y no sólo de los puntos en que tiene lugar su aceleración. Y las partículas superpotentes, probablemente, irrumpen en nuestro entorno procediendo de galaxias vecinas.

No podemos aseverar que todo en el mundo ocurre así, y solamente así, como acabamos de relatar. Lo expuesto representa, únicamente el cuadro de los fenómenos electromagnéticos en el Universo más natural desde el punto de vista de la ciencia moderna. Y como se puede advertir este cuadro está bosquejado con pinceladas muy sueltas. Lo último se debe no sólo al hecho de que el cuadro es muy grande. Por ahora, los detalles de los fenómenos siguen siendo confusos para los propios científicos pintores. Además, todavía ni siquiera se ha "secado" la "pintura" en este cuadro: ha sido creado no mucho atrás, y solamente su integridad infunde la esperanza de que, en su base, sea correcto.

La conversación de los coautores

Mientras que en el cosmos se desenvolvían los acontecimientos portentosos que le correspondían, en uno de los pisos de Moscú, una "pequeña colectividad de amigos" (así se denominaban a ellos mismos los autores) se veía desgarrada por las contradicciones. Para el momento en que el trabajo sobre el libro ya estaba en plena marcha, los autores se dieron cuenta de que sus posiciones, expresándose con suavidad, no coinciden del todo.

Como se va a averiguar de lo ulterior, la esencia de la disputa permitirá fijar a uno de los coautores el nombre de Manso (M., en forma abre-

viada) mientras que el otro se denominará Reacio (brevemente, R.).

M. ¡Tú sabes cómo yo te respeto! Pero, ¿qué haces tú?

En vez de contar sin pretensiones sobre la esencia de las fuerzas, tú, convirtiéndote en un archivero, registras escrupulosamente, con los pormenores innecesarios, todas las manifestaciones de las fuerzas electromagnéticas que conoces. Y, por si esto fuese poco, además, estás buscando y rebuscando en los libros las descripciones de las manifestaciones de las fuerzas las cuales, pérdoname, no conoces en absoluto.

¿Acaso con semejante cosa soñaba nuestro lector, al adquirir este libro? ¿Qué? ¿Piensas que él necesita un libro de texto más?

R. Con tu permiso, por cuanto el libro no recibió la aprobación del correspondiente ministerio, no es todavía un libro de texto. Además, ¿acaso no hemos prometido relatar sobre las fuerzas en la naturaleza? Y esto significa que se trata de las fuerzas que rodean a cada uno de nosotros. No se puede, de ningún modo, soslayar el rozamiento, la elasticidad, las fuerzas químicas, etc. Es que escribimos no para jóvenes filósofos que quieren saber, únicamente, las bases de las bases, sin que les interese aquello que se desarrolla diariamente en torno a nosotros, por encima de nosotros y debajo de nuestros pies.

M. Confío en que tienes las más buenas intenciones. Pero, en el caso de seguir tu camino, será necesario, por ejemplo, hablar no sólo sobre el rozamiento en los líquidos en general, sino también, sobre el de una bolita, un cilindro, un cubo, etc. Entonces, todo resultará distribuido por sus respectivos "anaqueles".

Yo, por supuesto, estoy exagerando algo, pero, sin duda alguna, a ti te es inherente la tendencia a distribuir todo por los anaqueles.

R. Bueno, ¿qué es lo que propones entonces? ¿Proceder como dice la vieja anécdota en que el hijito sabihondo dejaba pasmado a sus padres y a todos los circunstantes por el extremo laconismo científico de sus respuestas? A todas las preguntas —¿qué, cómo y por qué?— éste contestaba de modo tajante: es la electricidad.

¿Y qué? ¿Nosotros también debemos escribir: la estaticidad es electricidad; el rozamiento, también es electricidad; las fuerzas químicas son fuerzas eléctricas, etc.?

M. Pero, mira qué resultado obtuviste. Tienes aquí la estructura de los gases junto con los líquidos (cosa que conoce todo el mundo), también hablas sobre las particularidades de las fuerzas en los cristales (cuestiones que conoce poca gente y que, en cambio, no interesan casi a nadie)....

Si, a pesar de todo, quieres escribir sobre este tema, bueno, escribe. Pero, hazlo de una forma tal que el lector no se adormezca, o bien, que no eche el libro en algún rincón apartado.

R. ¿Acaso no comprendes que esto es difícil, muy difícil. Es más interesante y simple escribir, por ejemplo, sobre la teoría de la relatividad que sobre las fuerzas químicas. Y, además, sobre cada tipo de fuerzas electromagnéticas es necesario escribir un libro aparte. Si se quiere ser lacónico, cuesta trabajo no parecer aburrido.

M. En cuanto a la teoría de la relatividad, no sólo es más interesante escribir sobre ésta, sino también leer.

Me da pena pensar que mi coautor, conscientemente, se expone al riesgo de ser aburrido. ¿Con qué objetivo? Existen, en fin de cuentas, enciclopedias en las cuales cada uno puede leer todo lo que le dé la gana.

R. En este caso, sea que dicha parte del libro hará, precisamente, las veces de enciclopedia, pero una enciclopedia que, a pesar de todo (co-

mo abrigo la esperanza) será más apropiada para una lectura no demasiado extenuante.

M. Veo que estás en tus trece. Mientras tanto, en tu relato no hay siquiera una secuencia elemental. Después de los rayos cósmicos quieres pasar inmediatamente a los peces eléctricos.



R. Bueno, ¿y qué? Que sean peces. Quien no se interese por éstos, que no lea.

Además, en general, el lector contemporáneo es muy ingenioso. No leerá el libro consecutivamente, si encuentra en éste párrafos fastidiosos. Pero tampoco lo abandonará, si halla cosas interesantes. En el peor de los casos, que, en general, no lea este capítulo.

M. Hum... Por cuanto eres tan terco, no se puede hacer nada.

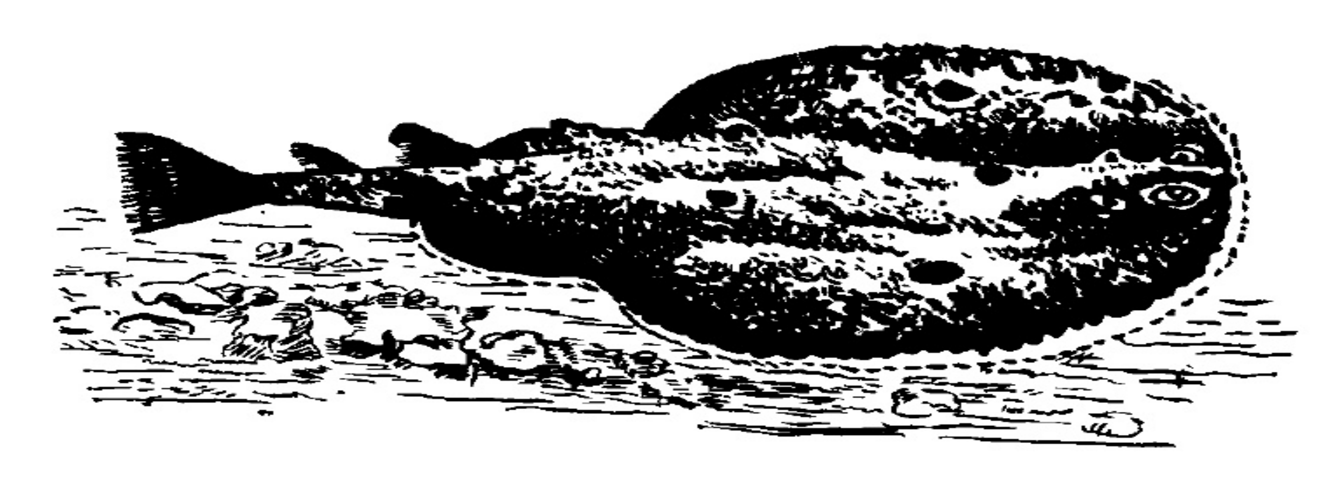
R. No te aflijas sobremanera. No olvides que tenemos también un redactor. Si nos dice: tachen todo esto, lo tacharemos.

En eso quedamos.

Peces eléctricos

Así, pues, se trata de peces eléctricos. Son seres únicos en su género que se distinguen de su "cofradía" por el hecho de que llevan en sí pilas galvánicas vivas. La corriente eléctrica que generan sirve de arma de defensa o de ataque.

Reviste interés el hecho de que entre los peces fósiles había mucho más eléctricos que entre los que prosperan hoy en día. Por lo visto, la utilización manifiesta de las fuerzas electromagnéticas resultó no tan eficaz como el perfeccionamiento de aquellas que acusan su presencia de modo implícito: en primer lugar son las fuerzas musculares.



El representante más brillante de la especie que nos interesa es el pez torpedo provisto de "aparato eléctrico". Este pez que habita los mares cálidos, tiene cerca de 100 kilogramos de peso, y su longitud llega a 2 metros, aproximadamente. Los órganos eléctricos dispuestos por los lados de la cabeza pesan más de 16 kilogramos. Un pez torpedo no cansado es capaz de producir corriente de 8 amperios de intensidad con la tensión de 300 voltios. Semejante descarga representa un peligro serio para el hombre.

Difícilmente se puede esperar que los peces eléctricos sean muy sensibles a la corriente. Y, en efecto, el torpedo soporta con facilidad las tensiones mortales para otros peces.

Los órganos eléctricos del torpedo, por su estructura, se asemejan asombrosamente a una batería de pilas galvánicas. Constan de numerosas placas apiladas (conexión en serie) situadas

unas junto a otras en muchas filas (conexión en paralelo).

Una cara de la placa es lisa y lleva carga negativa. La otra, con papilas salientes) está cargada positivamente. Como se debe, todo el dispositivo está encerrado en un tejido eléctricamente aislante.

No haremos intentos de penetrar profundamente en el mecanismo de la aparición de la fuerza electromotriz en los órganos del pez torpedo, como en su tiempo, nos abstuvimos de analizar el principio de acción de una pila galvánica ordinaria (seguiremos el consejo de M.). Aquí existen aún muchas cosas no claras. Se puede afirmar con seguridad solamente esto: la base del trabajo de los órganos eléctricos la forman las fuerzas químicas, al igual que en una pila galvánica.

Tampoco vamos a ampliar el círculo de nuestros conocidos entre los peces eléctricos.

Solamente no se puede dejar de mencionar a un morador admirable del Nilo: se trata de mormiro, un pez con el hocico cónico, alargado y algo encorvado. Este pez está dotado de un localizador asombroso. En la base de su aleta caudal tiene dispuesto un generador de corriente eléctrica alterna, que envía impulsos con frecuencia de varios centenares de oscilaciones por segundo. Los objetos circundantes deforman el campo eletromagnético alrededor del mormiro lo que se registra inmediatamente por el dispositivo receptor en su dorso. La sensibilidad del localizador es extraordinariamente grande. Al mormiro no se puede captar en una red. Y en el acuario, comienza a moverse rápidamente de un lado para otro en cuanto uno pasa varias veces el peine por los cabellos.

La naturaleza del impulso nervioso

Al fin y al cabo, el torpedo y otros peces semejantes a éste, con toda su hacienda eléctrica, no son más que el antojo de la naturaleza. Y ésta proporcionó una parte mucho más considerable a la *electricidad libre en los organismos vivos*. La electricidad en cuestión atiende las líneas de comunicación que transmiten al cerebro "telegramas" provenientes de los órganos de los sentidos que informan sobre todos los acontecimientos ocurridos en el mundo externo, así como reciben las órdenes dirigidas por el cerebro a cualesquiera músculos y a todos los órganos viscerales.

Los nervios atraviesan todo el cuerpo de los seres vivos más o menos perfectos, y gracias a los mismos el organismo interviene como un todo único que actúa, a veces, con sorprendente racionalidad. Basta cortar un nervio que conduce a cualquier músculo, y éste se torna paralizado, análogamente a como deja de trabajar el cilindro de un motor si se corta el alambre transmisor de los impulsos hacia la bujía de encendido.

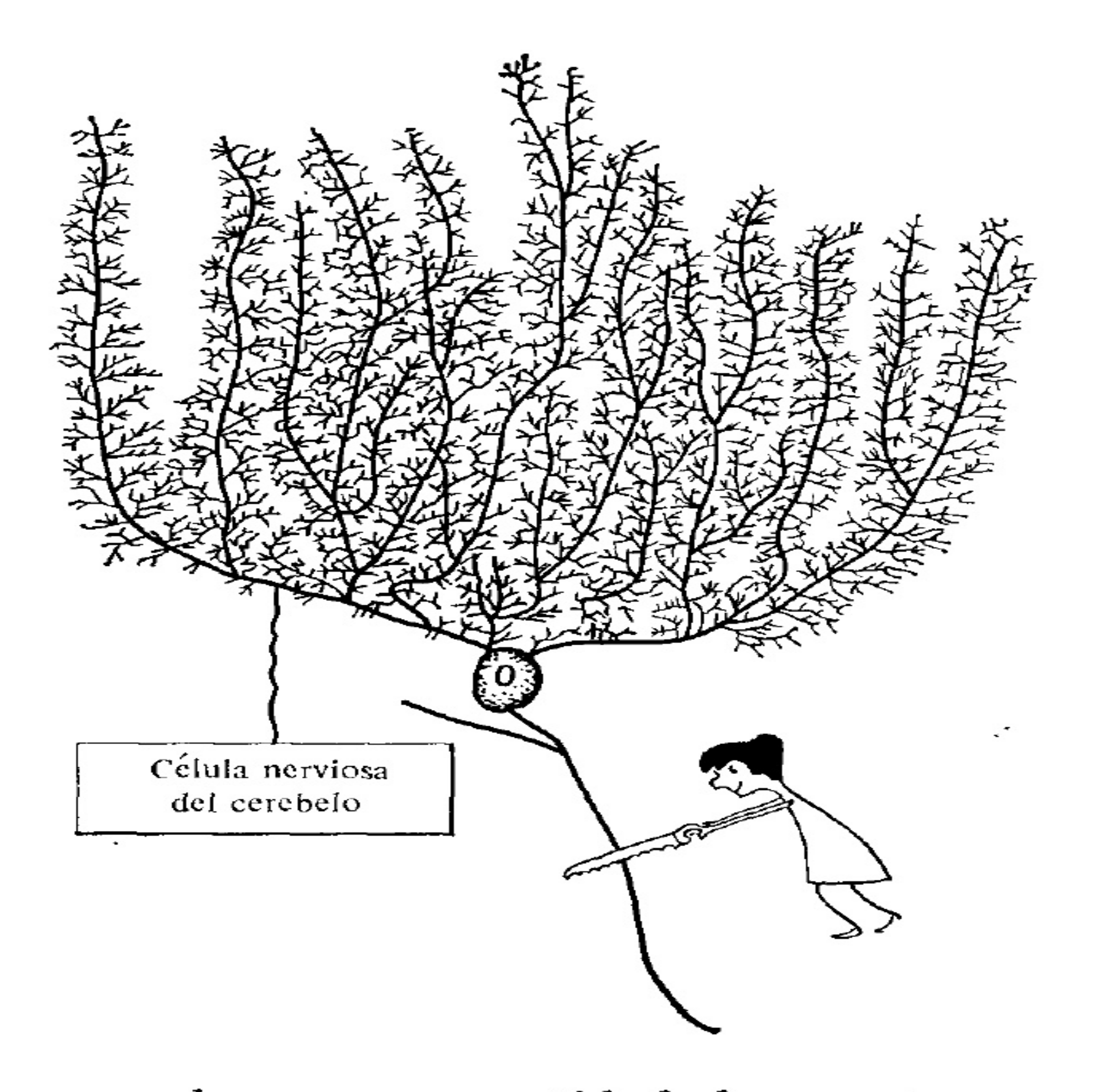
Lo dicho no es mera analogía exterior. Ya desde los tiempos de Galvani fue establecido que la señal (*el impulso nervioso*) transmitida a las fibras nerviosas es un impulso eléctrico de corta duración. Por cierto, el asunto no es tan simple como se podrá pensar. El nervio no es un canal pasivo de alta conductibilidad, como un alambre metálico común y corriente. Aquél recuerda más bien lo que en la técnica lleva el nombre de línea de relés, cuando la señal suministrada se transmite tan sólo a los tramos vecinos de la línea donde se amplifica, y únicamente después prosigue su camino, amplificándose de nuevo, etc. Debido a esta cirunstancia la señal puede

transmitirse, sin su debilitamiento, a distancias considerables a pesar de la atenuación natural.

¿Qué es, entonces, un nervio? En los trabajos de R. Gerard se puede leer: "Si el tamaño de la araña, que observamos desde la tierra, colgada de un hilo de telaraña a la altura de un edificio de seis pisos, disminuimos veinte veces, aproximadamente, (incluyendo el hilo de que está suspendida) entonces, ésta se asemejaría mucho a una célula nerviosa o a una neurona. El cuerpo de la célula nerviosa no se distingue de otras ni por sus dimensiones ni por otras particularidades cualesquiera... Sin embargo, la neurona, a diferencia de las células ordinarias *que no tienen nada* de curioso, posee no sólo el cuerpo celular: ésta envía para investigar los rincones más apartados del organismo finas prolongaciones filiformes llamadas dendritas. La mayoría de éstas se extiende a distancias pequeñas... Sin embargo, una prolongación fina, menor que 0,01 mm de diámetro, como poseída de pasión al peregrinaje, se aleja de la neurona a distancias enormes, medidas en centímetros e, incluso, en metros.

Todas las neuronas del sistema nervioso central están agrupadas juntas en el encéfalo y la médula espinal donde forman la sustancia gris... Y tan sólo las prolongaciones largas, los axones, las unen con otras partes del cuerpo. Los haces de estos axones, o cilindroejes, que parten de las células nerviosas próximas unas a otras forman los nervios". Una sustancia especial, la mielina, envuelve en forma de una capa fina la mayoría de los axones, análogamente a como la cinta aisladora envuelve el alambre eléctrico.

El propio axón se puede figurar, de manera simplificada, como un tubo cilíndrico largo con membrana superficial que separa dos soluciones acuosas de distinta composición química y diferente concentración. La membrana es similar

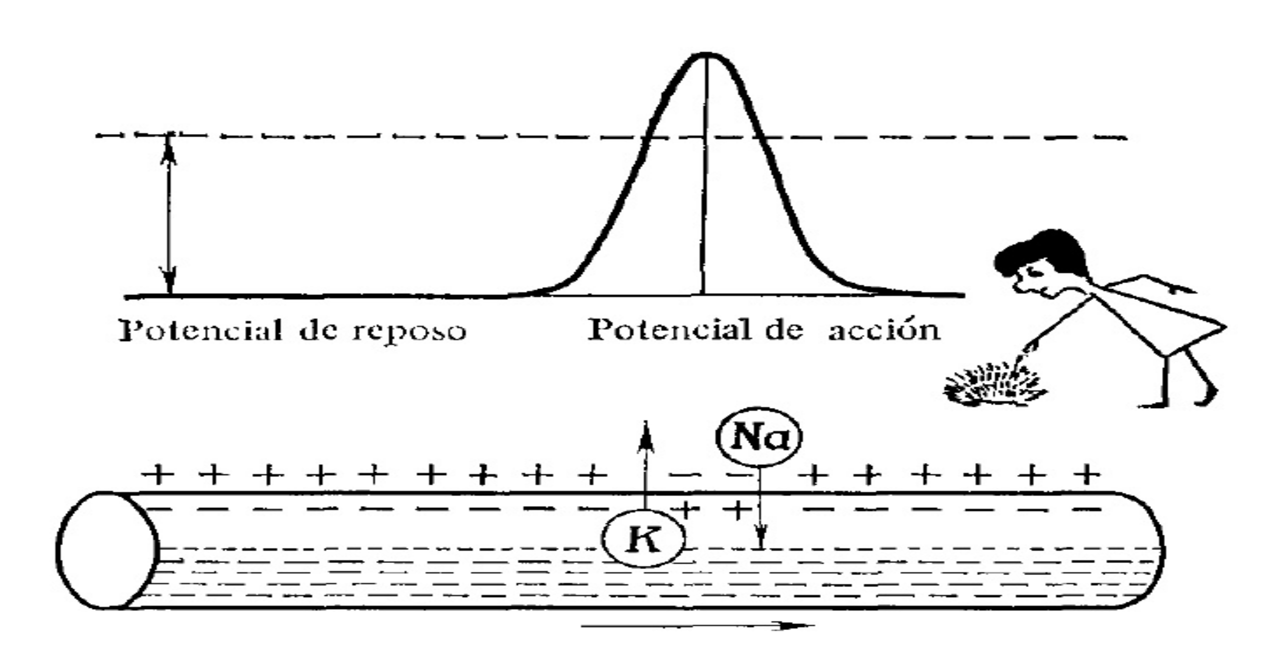


a una pared con gran cantidad de puertas semiabiertas a través de las cuales los iones de las soluciones pueden pasar solamente con gran dificultad, "apretujándose". Lo más asombroso es que el campo eléctrico hace el paso a través de estas puertas todavía más estrecho, mientras que con el debilitamiento del mismo las puertas se abren más.

En estado inactivo dentro del axón se encuentra el exceso de los iones potasio, y fuera del mismo, el de los iones sodio. Los iones negativos se concentran, principalmente, en la superficie interior de la membrana y, por lo tanto, ésta está

cargada negativamente, mientras que la superficie externa está cargada positivamente.

Cuando el nervio se irrita tiene lugar la despolarización parcial de la membrana (disminución de las cargas en sus superficies), lo que da lugar a la disminución del campo eléctrico dentro de ella. Como resultado, se "entreabren las puertas" para los iones sodio, y éstos comienzan a penetrar en el interior de la fibra. Al fin y al cabo tiene lugar la despolarización local de la membrana.



Así surge el impulso nervioso. Hablando con propiedad, es el impulso de tensión*: provocado por la circulación de la corriente a través de la membrana.

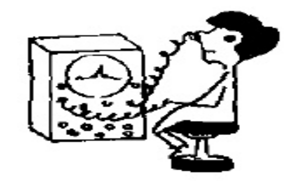
En este instante "se entreabren las puertas" para los iones potasio. Al salir a la superficie del axón, éstos, poco a poco, restablecen la tensión (cerca de 0,05 V) que tenía el nervio no excitado.

---

* Abrigamos la esperanza que todo el mundo se represente más o menos qué es la tensión en la red eléctrica. Aquí la palabra tensión tiene el mismo sentido.

Con ojos cerrados Con ojos abiertos Con ojos cerrados

50 mV



Durante la despolarización de un sector de la membrana aparece la corriente eléctrica dirigida desde las partes de ésta todavía no activas al sector despolarizado. Como consecuencia, se forma un nuevo sector despolarizado el cual, a su vez, excita procesos en el sector vecino, etc. El estado autorreproductor de despolarización comienza a propagarse por la primera fibra, sin amortiguarse, a una velocidad de cerca de 120 metros por segundo. Ésta es, precisamente, la velocidad del movimiento del impulso nervioso.

Los iones sodio y potasio desplazados durante el paso del impulso de sus sitios acostumbrados regresan, poco a poco, atrás, penetrando directamente a través de la pared a costa de unos procesos químicos cuyo mecanismo queda hasta ahora sin aclarar.

Despierta asombro y admiración el hecho de que todo el comportamiento de los animales superiores y todos los esfuerzos creadores del cerebro humano descansan, en fin de cuentas, sobre estas corrientes extraordinariamente débiles y sobre sutilísimas, microscópicas reacciones químicas.

Corrientes biológicas del cerebro

Aquí tocamos el sanctasanctórum de la naturaleza viva: el cerebro humano. En el cerebro se

operan ininterrumpidamente procesos eléctricos. Si sobre la frente y la nuca se ponen placas metálicas conectadas a través de un amplificador a un instrumento registrador, se pueden registrar oscilaciones eléctricas continuas de la corteza del encéfalo*. Su ritmo, forma e intensidad dependen esencialmente del estado de la persona.

En el cerebro del hombre que está sentado tranquilamente, con ojos cerrados, y que no piensa en nada se producen cerca de 10 oscilaciones por segundo (las llamadas ondas alfa). Cuando el hombre abre los ojos las ondas alfa desaparecen y aparecen otras oscilaciones más rápidas e irregulares.

Cuando el hombre se duerme el ritmo de las ondas alfa se hace más lento y su amplitud incrementa. Si se ve un sueño el carácter de las oscilaciones se modifica algo lo que permite determinar con bastante precisión los momentos del comienzo y del fín de lo soñado.

Durante las enfermedades del cerebro el carácter de las oscilaciones eléctricas se altera con especial fuerza. De este modo, las oscilaciones patológicas durante la epilepsia pueden servir de síntoma certero de la enfermedad.

Todo lo expuesto demuestra que las células cerebrales se encuentran en estado de constante actividad, y grandes cantidades de éstas "oscilan juntas como violines de una enorme orquesta". Los impulsos nerviosos que llegan al cerebro no van por el camino trillado, sino cambian todo el cuadro de distribución de las oscilaciones en la corteza de los hemisferios cerebrales.

El carácter de la actividad eléctrica del cerebro varía con la edad en el curso de toda la vida y de la instrucción.

---

* Las oscilaciones se observan no soló en el cerebro del hombre, sino también en el de los animales.

Vale suponer que las oscilaciones eléctricas no simplemente acompañan el trabajo del cerebro, como el ruido el movimiento del automóvil, sino que representan un momento sumamente sustancial de toda su actividad vital. Cuando se trata de una máquina calculadora electrónica capaz de cumplir las distintas funciones del cerebro incluso mejor que el propio cerebro, precisamente los procesos electromagnéticos determinan todo su trabajo.

Es necesario subrayar que no es ni mucho menos que a cada sensación y a cada pensamiento corresponde su propia oscilación determinada. Por la forma de las oscilaciones eléctricas es imposible determinar en qué piensa el hombre.

Por ahora no sabemos todavía qué funciones cumplen estos procesos en el cerebro. Sin embargo, éstos nos muestran nítidamente que la base material del pensamiento son los procesos electromagnéticos en la materia más altamente organizada que la naturaleza creó en nuestro planeta.

5. Ondas electromagnéticas en la naturaleza

Los rayos del Sol

Iván Karamázov, uno de los personajes más tenebrosos creados por el genio de Dostoievski, dice: "Me son entrañables las pequeñas hojas pegajosas que despuntan en la primavera, me es entrañable el cielo azul".

La luz del Sol siempre ha sido y sigue siendo para el hombre el símbolo de la eterna juventud, de todo lo mejor que puede haber en la vida. La emocionante alegría del hombre que vive bajo el Sol se siente también en el primer verso de un niño de cuatro años:

¡Que siempre viva el Sol,
Que siempre viva el cielo,
Que siempre viva mi madre,
Que siempre viva yo!

como asimismo en la cuarteta del maravilloso poeta Dmitri Kedrin:

Me dices que la juventud está ya lejos
Y que el fuego que ardía se extinguió.
¡Más mira, el cielo de azul radiante lleno!
¡Y cuánto tiempo ha que él nació...!

El reino tenebroso, el reino de las tinieblas no se la mera ausencia de luz, sino el símbolo de todo lo penoso y agobiante para el alma humana.

La adoración del Sol es el antiquísimo y hermosísimo culto de la humanidad. Es el fantástico dios de los peruanos Kon-Tiki, es la divinidad de los antiguos egipcios Ra. En el albor mismo de su existencia los hombres supieron entender que el Sol es la vida. Nosotros ya hace mucho tiempo nos damos cuenta de que el Sol no es un



dios, sino una esfera incandescente, pero la humanidad, por los siglos de los siglos conservará su profundísima veneración de este Astro.

Hasta el físico que está acostumbrado a tener que ver con el registro exacto de los fenómenos, se siente embargado por la sensación de cometer un sacrilegio cuando dice que la luz del Sol no es sino ondas electromagnéticas de determinada longitud. Sin embargo, sea como fuere, éste es el *hecho y en nuestro libro tenemos que procurar* abordar solamente este aspecto.

Percibimos como luz las ondas electromagnéticas cuya longitud se halla dentro de los límites de 0,00004 centímetros a 0,000072 centímetros. Otras ondas no originan impresiones visuales.

La longitud de la onda luminosa es muy pequeña. Figúrense una ola del mar de tamaño medio aumentada hasta ocupar todo el océano Atlántico, desde Nueva York en la costa norteamericana hasta Lisboa en Europa. Con el mismo aumento la longitud de la onda luminosa solamente un poco superaría el ancho de esta página.

El ojo y las ondas electromagnéticas

El lector conoce perfectamente que existen ondas electromagnéticas de longitud completamente distinta. Hay ondas kilométricas; también se dan ondas más cortas que la luz visible; se trata del diapasón ultravioleta, de los rayos X, etc. *¿Por qué razón* la *naturaleza confeccionó* nuestro ojo (al igual que los ojos de los animales adaptando su sensibilidad precisamente a un intervalo determinado y relativamente estrecho de longitudes de onda?

En la escala de ondas electromagnéticas la luz visible ocupa una franja minúscula, apretada entre los rayos ultravioletas e infrarrojos. Y por los bordes se extienden bandas anchas de ondas

radioeléctricas y rayos gamma emitidos por los núcleos atómicos.

Todas estas ondas son portadores de energía y al parecer podrían con el mismo éxito realizar para nosotros aquello que hace la luz. El ojo habría podido ser sensible también a éstas.

Se sobreentiende de inmediato que estamos en condiciones de decir que no todas las longitudas de ondas son idóneas. Los rayos gamma y los rayos X se emiten de forma notable solamente en circunstancias especiales y casi no están presentes en nuestro alrededor. Y "gracias a dios" que esto es así. Dichos rayos (en particular, esto se refiere a los rayos gamma) provocan la enfermedad por radiación, de modo que la humanidad no se vería capaz de gozar durante mucho tiempo del cuadro del mundo visto en los rayos gamma.

Las ondas radioeléctricas largas resultarían ser muy incómodas. Éstas contornean libremente los objetos de dimensiones métricas, análogamente a como las olas marinas contornean las rocas ribereñas salientes, y, por lo tanto, no podríamos examinar los objetos cuyo discernimiento nítido es para nosotros de vital importancia. El hecho de que las ondas contornean los obstáculos (la difracción) daría lugar a que veríamos el mundo "como un pez metido en el cieno".

Sin embargo, existen, además, los rayos infrarrojos (térmicos) capaces de calentar los cuerpos pero invisibles para nosotros. Éstos, al parecer, podrían con éxito suplantar aquellas longitudes de ondas que percibe el ojo. O bien, finalmente, el ojo podría adaptarse a los rayos ultravioletas.

Entonces, ¿es acaso completamente casual la elección de una franja estrecha de longitudes de ondas, que denominamos luz visible, precisamente en la porción dada de la escala? Es que

el Sol emite tanto luz visible, como rayos ultravioletas e infrarrojos.

¡No, de ningún modo esta elección es casual! No se trata de una casualidad. En primer término, el máximo de la irradiación de las ondas electromagnéticas por el Sol se encuentra, precisamente, en la región verde-amarilla del espectro visible. Y, sin embargo, ¡lo primordial no es esto! También en las regiones vecinas del espectro la irradiación será bastante intensa.

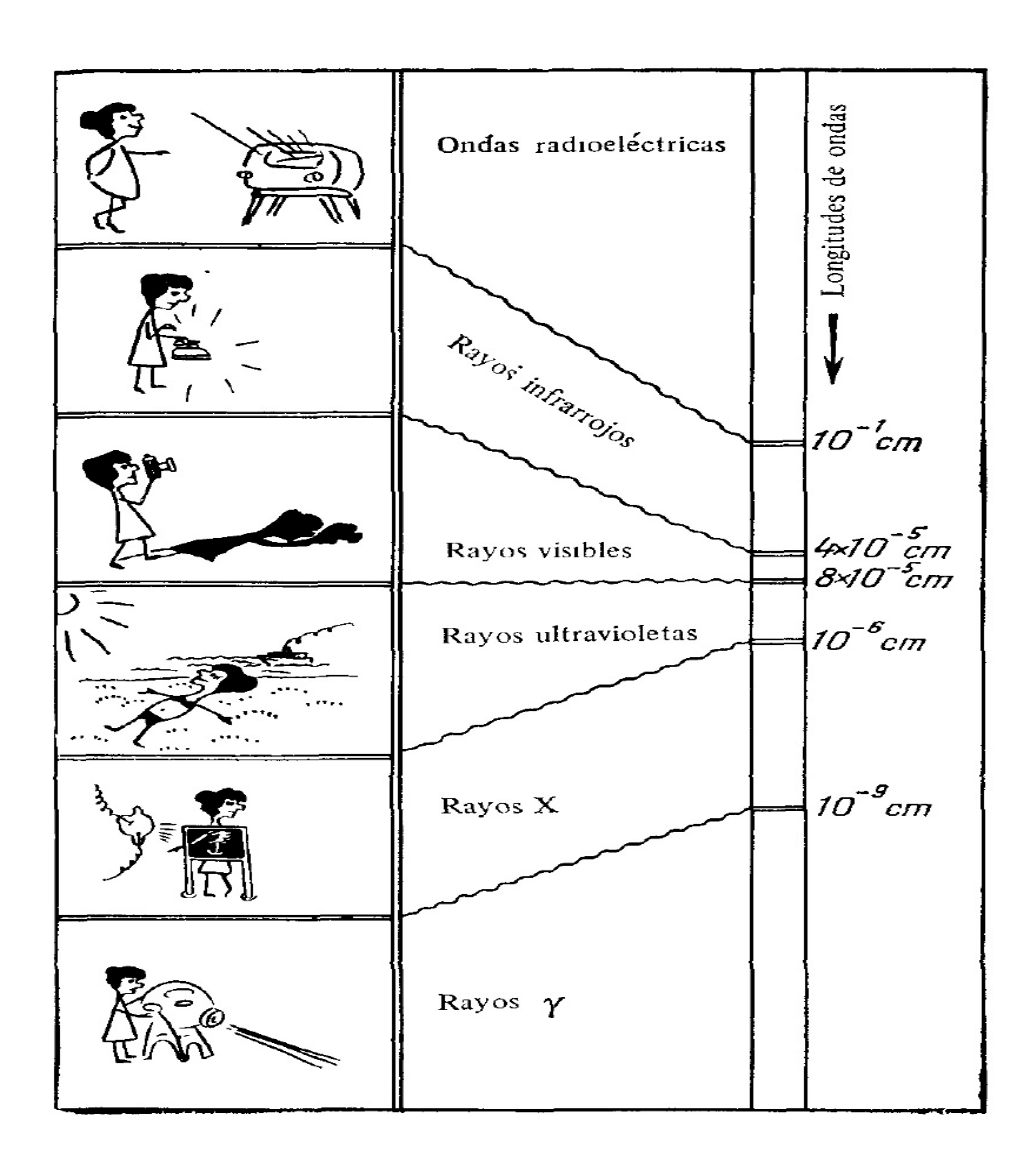
"Ventanas" en la atmósfera

Vivimos en el fondo del océano aéreo. La Tierra está rodeada de atmósfera. La consideramos transparente o casi transparente. Y, en efecto, lo es, pero tan sólo para un intervalo estrecho de longitudes de ondas (intervalo estrecho del espectro, como dicen en este caso los físicos) que, precisamente, percibe nuestro ojo.

Es la primera "ventana" óptica en la atmósfera. El oxígeno absorbe intensamente los rayos ultravioletas. El vapor de agua retiene la radiación infrarroja. Las ondas radioeléctricas largas "se rebotan" reflejándose de la ionosfera.

Sólo existe una "ventana" más, la "radioventana" transparente para las ondas desde 0,25 centímetros hasta 30 metros, aproximadamente. Sin embargo, como ya hemos mencionado, estas ondas resultan mal adaptadas para el ojo y, además, su intensidad en el espectro solar es demasiado pequeña. Se necesitó un gran salto en el desarrollo de la radiotécnica debido al perfeccionamiento de los radiolocalizadores durante la segunda guerra mundial para aprender a captar con seguridad estas ondas.

De este modo, en el proceso de lucha por la existencia los organismos vivos adquirieron un órgano que reaccionaba precisamente a aquellas



Ondas radioeléctricas
Rayos infrarrojos
Rayos visibles
Rayos ultravioletas
Rayos X
Rayos γ
Longitudes de ondas
10^{-1} cm
4×10^{-5} cm
8×10^{-5} cm
10^{-6} cm
10^{-9} cm



radiaciones que resultaban más intensas y se correspondían muy bien con su destinación.

El hecho de que el máximo de la radiación del Sol recae exactamente en el centro de la "ventana óptica" debe considerarse, a todas luces, un regalo complementario de la naturaleza. (En general, la naturaleza se mostró muy generosa para con nuestro planeta. Se puede decir que hizo todo, o casi todo, que estaba a su alcance para que los hombres pudieran nacer y vivir felices. Por supuesto, no podía "prever" todas las consecuencias de su generosidad, pero nos dotó de razón y, con ello, nos hizo responsables a nosotros mismos por nuestro ulterior destino.) Probablemente, se hubiera podido pasar sin la sorprendente coincidencia entre el máximo de radiación del Sol y el máximo de transparencia de la atmósfera. Los rayos de Sol, tarde o temprano, de todos modos, hubieran despertado la vida en la Tierra mostrándose capaces de mantenerla en adelante.

El cielo azul

Si este libro se lee no como un manual para los autodidactas que da pena abandonar por cuanto se ha invertido ya el tiempo y el dinero, sino "con

sentimiento, juicio y sin apresurarse", entonces, se debe prestar atención a una contradicción al parecer evidente. El máximo de radiación del Sol corresponde a la parte verde-amarilla del espectro, mientras tanto vemos a nuestro Lucero como amarillo.

La culpa la tiene la atmósfera. Esta deja pasar mejor la parte del espectro correspondiente a las ondas largas (amarilla), en tanto que la parte de las ondas cortas pasa peor. Por esta causa la luz verde resulta fuertemente debilitada.

En general, las ondas del diapasón corto se disipan por la atmósfera a todos los lados con especial intensidad. Es ésta la razón por la cual por encima de nuestras cabezas vemos el "cielo de azul radiante lleno" y no amarillo o rojo. De no existir absolutamente la atmósfera, no habría habido sobre nosotros el cielo acostumbrado. En su lugar se abriría un negro abismo con el Sol deslumbrador. Por ahora, sólo han observado este cuadro los cosmonautas.

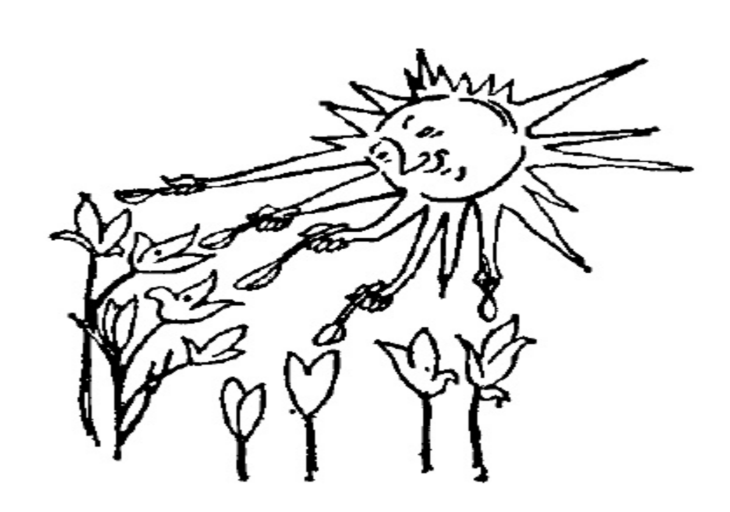
Este Sol exento de velo protector es despiadado. En las alturas montañosas, cuando todavía hay con qué respirar, el Sol se torna insoportablemente abrasador*: no se puede quedar sin vestimenta, y en la nieve, sin gafas ahumadas. Se puede quemar la epidermis y la retina de los ojos.

Los regalos del Sol

Las ondas luminosas que caen sobre la Tierra es un inapreciable don de la naturaleza. Ante todo, nos proporcionan calor y, con éste, la vida. Sin esta ofrenda del Sol el frío cósmico habría paralizado la Tierra. Si la cantidad de toda la energía consumida por la humanidad (el combus-

* La radiación ultravioleta es absorbida insuficientemente por las capas superiores de la atmósfera.

tible, el agua cayendo y el viento) aumentase 30 veces, incluso en este caso la totalidad constituiría tan sólo una milésima parte de la energía que gratuitamente y sin esfuerzo alguno por nuestra parte nos suministra el Sol.



Además, los tipos principales de combustible: la hulla y el petróleo, no son sino los "rayos del Sol en conserva". Son residuos de la vegetación que en los tiempos remotos cubría con exuberancia nuestro planeta, así como, en parte, como se supone, del reino animal.

En cierta época el agua en las turbinas de las centrales eléctricas en forma de vapor fue elevada por la energía de los rayos solares. Precisamente estos rayos ponen en movimiento las masas aéreas de nuestra atmósfera.

Pero esto no es todo. Las ondas luminosas no sólo calientan. Éstas despiertan en la sustancia la actividad química la cual es incapaz de provocar el simple calentamiento. El descoloramiento de las telas y el bronceado de la piel es resultado de las reacciones químicas.

Y las reacciones más importantes se desarrollan en las "pegajosas hojas primaverales", como asimismo, por lo demás, en las hojas aciculares de los coníferos, las hojas de la hierba y de los

árboles y en muchos microorganismos. Bajo el Sol, en las hojas verdes se operan procesos imprescindibles para toda la vida en la Tierra. Nos proporcionan alimento y nos dan el oxígeno para la respiración.

Nuestro organismo, al igual que los de otros animales superiores, es incapaz de combinar elementos químicos puros en cadenas complejas de átomos: moléculas de sustancias orgánicas. Nuestro aliento, sin cesar, contamina la atmósfera. Al consumir oxígeno, que es de necesidad vital, espiramos el gas carbónico (CO_2), con lo cual combinamos el oxígeno y hacemos que el aire ya no vale para la respiración. Es preciso purificarlo ininterrumpidamente. Este trabajo lo cumplen por nosotros las plantas en la tierra firme y los microorganismos en los océanos.

Las hojas absorben del aire el dióxido de carbono y desintegran sus moléculas en partes componentes: carbono y oxígeno. El carbono se utiliza para la construcción de los tejidos vivos de la planta, mientras el oxígeno puro retorna al aire. Añadiendo a la cadena carbonada átomos de otros elementos extraídos del suelo por las raíces, las plantas construyen moléculas de proteínas, grasas e hidratos de carbono, o sea, forman el alimento para el hombre y para los animales.

Todo esto se produce a costa de la energía de los rayos solares. Aquí, además, es de especial importancia no solamente la propia energía, sino también la forma en que ésta se suministra. La fotosíntesis (así denominan este proceso los científicos) sólo puede desarrollarse por la acción de las ondas electromagnéticas en un intervalo determinado del espectro.

No haremos intentos de relatar sobre el mecanismo de la fotosíntesis. Éste no se ha aclarado todavía hasta el final. Cuando esto suceda, para

la humanidad, probablemente, despuntará una nueva era. Se podrá cultivar proteínas y otras sustancias orgánicas directamente en las retortas bajo el cielo azul.

Presión de la luz

La luz engendra sutilísimas reacciones químicas. Simultáneamente la luz resulta susceptible de realizar acciones mecánicas simples. La misma presiona sobre los cuerpos circundantes. Es verdad que también en este caso la luz manifiesta cierta delicadeza. La presión lumínica es muy pequeña. En un día de Sol despejado, a un metro cuadrado de superficie terrestre le corresponde una fuerza sólo de medio miligramo, aproximadamente.

Sobre todo el globo terráqueo actúa una fuerza bastante considerable, cerca de 60 000 toneladas, pero es ínfima en comparación con la fuerza gravitacional (es 10^{14} veces menor).

Por esta causa, para descubrir la presión de la luz, se necesitó el gran talento de P. N. Lébedev. El científico midió, a principios de nuestro siglo, la presión no sólo sobre los cuerpos sólidos, sino también sobre los gases.

A pesar de que la presión de la luz es muy pequeña, su acción puede surtir efectos notables.

Un caso interesante ocurrió con el satélite norteamericano "Eco". Después de salir el satélite a la órbita se llenó de gas una envoltura grande de polietileno. Se formó un globo ligero de cerca de 30 metros de diámetro. Inesperadamente se puso de manifiesto que durante una revolución, por la presión de los rayos solares, éste se desplaza de la órbita en 5 metros. Como resultado, el satélite, en vez de 20 años, como se planificó, se mantuvo en la órbita menos que un año.

En el seno de las estrellas a la temperatura de varios millones de grados la presión de las ondas electromagnéticas debe alcanzar valores ingentes. Es de suponer que esta presión, a la par de las fuerzas gravitacionales y la presión ordinaria, desempeña un papel sustancial en los procesos intraestelares.

El mecanismo del surgimiento de la presión lumínica es relativamente simple, y podemos decir acerca de éste varias palabras. El campo eléctrico de la onda electromagnética que incide sobre la sustancia hace balancearse los electrones. Éstos comienzan a oscilar en dirección transversal respecto a la dirección de propagación de la onda. Pero esto, de por sí, todavía no origina presión.

Sobre los electrones puestos en movimiento comienza a actuar el campo magnético de la onda. Es este campo, precisamente, el que empuja los electrones a lo largo del rayo luminoso, lo que, en fin de cuentas, da lugar a la aparición de la presión sobre el pedazo de la sustancia en conjunto.

Los mensajeros de los lejanos mundos

Conocemos cuán enormes son los infinitos espacios del Universo en el cual nuestra Galaxia es tan sólo una agrupación ordinaria de estrellas, mientras que el Sol no es sino una estrella típica perteneciente a las enanas amarillas. Solamente dentro del sistema solar se pone de manifiesto la situación privilegiada del globo terráqueo. La Tierra es el planeta más apropiado para la vida entre todos los demás del sistema solar.

Estamos enterados no sólo de la disposición de los innumerables mundos estelares, sino también de su composición. Éstos están estructura-

dos a partir de los mismos átomos que nuestra Tierra. El Universo es único.

La luz es mensajera de los lejanos mundos. Es la fuente de la vida y es también la fuente de nuestros conocimientos acerca del Universo. "¡Cuán grande y hermoso es el mundo!" — nos dicen las ondas electromagnéticas que llegan a la Tierra. Pero "hablan" únicamente las ondas electromagnéticas, pues los campos gravitacionales no nos proporcionan una información ni siquiera en cierto grado equivalente acerca del Universo.

Las estrellas y los cúmulos de estrellas pueden verse a simple vista o en los telescopios. Pero, ¿de dónde sabemos de qué se componen éstos? Aquí, para ayudar al ojo, acude el aparato espectral que "clasifica" las ondas luminosas por sus longitudes y las envía en direcciones diferentes.

Los cuerpos sólidos o líquidos calientes emiten el espectro continuo, es decir, ondas de todas las longitudes posibles, comenzando por las infrarrojas largas y terminando con las ultravioletas cortas.

Otra cosa completamente distinta son los átomos aislados o casi aislados del vapor incandescente de la sustancia. Su espectro es una empalizada de líneas coloreadas de diferente brillo separadas por anchas franjas oscuras. Corresponde a cada línea coloreada una onda electromagnética de determinada longitud*.

Lo primordial es que los átomos de cualquier elemento químico dan su espectro disímil a los espectros de los átomos de otros elementos. A semejanza de las huellas dactilares de los hombres, los espectros de rayas de los átomos poseen

* A propósito, cabe señalar que fuera de nosotros en la naturaleza no existe color alguno, y sólo se tiene ondas de diferente longitud.

su individualidad inimitable. El carácter inimitable del dibujo en la piel del dedo ayuda a buscar al delincuente. De la misma forma la individualidad del espectro pertrecha a los físicos con la posibilidad de determinar la composición química del cuerpo sin tocarlo, y no solamente cuando este cuerpo se encuentra aquí, al lado, sino también cuando el mismo está alejado a unas distancias que incluso la luz salva en el período de millones de años. Lo único que se necesita es que el cuerpo brille con luz intensa*.

Los elementos que existen en la Tierra "se hallaron" también en el Sol y en las estrellas. Y en cuanto al helio, éste, incluso, primeramente fue descubierto en el Sol y sólo al cabo de cierto tiempo fue encontrado en la Tierra.

Si los átomos emisores se encuentran en el campo magnético su espectro varía sustancialmente. Las distintas franjas coloreadas se desdoblan en varias líneas. Precisamente esta circunstancia permite descubrir el campo magnético de las estrellas y evaluar su magnitud.

Las estrellas están tan lejanas que no podemos advertir directamente si éstas se mueven o no. Sin embargo, las ondas luminosas que llegan de las mismas nos traen también esta información. La variación de la longitud de onda con la velocidad del movimiento del manantial (el efecto Doppler del que hemos hecho mención ya antes) da la posibilidad de juzgar no sólo sobre las velo-

* La composición química del Sol y de las estrellas se determina, hablando con propiedad, no por los espectros de emisión, pues se trata de un espectro continuo de la fotosfera densa, sino por los de absorción por la del Sol. El vapor de la sustancia absorbe con mayor intensidad precisamente aquellas longitudes de ondas que emite en estado incandescente. Las líneas oscuras de absorción sobre el fondo del espectro continuo permiten determinar la composición de los astros celestes.

cidades de las estrellas, sino también sobre su rotación.

Anteriormente, la información fundamental sobre el Universo llegaba hacia nosotros a través de la "ventana óptica" en la atmósfera. Con el progreso de la radioastronomía una cantidad cada vez mayor de datos nuevos acerca de las galaxias llega también a través de la "radioventana".

Hoy en día se presenta la posibilidad de emplazar los aparatos sensibles a las radiaciones de alta frecuencia en estaciones cósmicas orbitales. Gracias a esta circunstancia fueron descubiertas más de cien estrellas de rayos X las que emiten dichos rayos. Además, emiten los rayos X las envolturas de las estrellas supernovas (por ejemplo, la nebulosa del Cangrejo que nació como resultado del estallido de la Supernova en 1054), así como los cuasares y algunas galaxias.

A principios de los años 70, con la ayuda de varios satélites norteamericanos "Vela" que se encotraban en las órbitas simultáneamente, se detectaron sobresaltos de rayos gamma de una duración desde fracciones de segundo hasta decenas de segundos.

De dónde provienen las ondas electromagnéticas

Sabemos —o pensamos que sabemos— cómo se efectúa el nacimiento de las ondas radioeléctricas en el Universo. Un poco antes, de paso, se ha hecho mención de uno de los manantiales de radiación: es la radiación térmica que se origina durante el frenado de las partículas cargadas en colisión. Reviste gran interés la radioemisión no térmica.

La luz visible, los rayos ultravioletas y los *infrarrojos tienen preferentemente origen térmico*. La alta temperatura del Sol y de otras

estrellas es la causa principal del nacimiento de las ondas electromagnéticas. Las estrellas emiten también ondas radioeléctricas, pero su intensidad, habitualmente, es pequeña.

La radiación Roentgen tiene origen térmico, o bien, es sincrotrónica. La nebulosa del Cangrejo emite rayos X debido a la rotación rápida de los electrones relativistas en un campo magnético intenso. El origen de los sobresaltos de la radiación gamma todavía no se ha aclarado. La radiación de ondas cortas: los rayos gamma y X, se engendra también durante los impactos de las partículas cargadas de los rayos cósmicos con los átomos de la atmósfera terrestre. Por cierto, nacidos en las capas superiores de la atmósfera, estos rayos, al pasar a través de todo su espesor, se absorben casi por completo y no llegan a la superficie de la Tierra.

La desintegración radiactiva de los núcleos atómicos es el suministrador principal de los rayos gamma junto a la superficie de la Tierra. Aquí la energía se extrae del "acervo energético" más rico de la naturaleza, del núcleo atómico.

También todos los seres emiten ondas electromagnéticas. En primer lugar, al igual que cualquier cuerpo caliente irradian rayos infrarrojos. Algunos insectos (por ejemplo, las luciérnagas) y los peces de las profundidades oceánicas emiten luz visible. En este caso la luz se engendra a costa de las reacciones químicas en los órganos luminiscentes (luz fría).

Finalmente, durante las reacciones químicas relacionadas con la división de las células de los tejidos vegetales y animales se irradian rayos ultravioletas. Son los llamados rayos mitogenéticos descubiertos por el científico soviético Gúrvich. En un tiempo parecía que les pertenece un papel importante en la actividad vital de las

células, pero más tarde los experimentos más exactos —en la medida en que se podía juzgar— dieron lugar a la aparición de unas dudas.

Una "nubecilla" significativa

El lector que en el curso de todo este capítulo tan largo, probablemente ya se cansara de asombrarse por la *infinita diversidad* de las *manifestaciones* del electromagnetismo, podría llegar a la conclusión que en el mundo no hay otra teoría que experimentase tan pocos contratiempos. Es verdad que, al hablar sobre la estructura del átomo, hubo cierto tropiezo. Pero, en lo demás, la electrodinámica parece ser irreprochable e invulnerable.

Esta sensación de un bienestar desmedido apareció entre los físicos a finales del siglo pasado cuando todavía se ignoraba la estructura del átomo. Esta sensación era tan plena que Thomson, el célebre físico inglés, en la divisoria de los dos siglos, tenía al parecer el motivo para hablar sobre el horizonte científico despejado y su ojo sólo divisaba en éste dos "pequeñas nubecillas". Se trataba de los experimentos de Michelson dedicados a la medición de la velocidad de la luz y del problema de la capacidad calorífica: es que la teoría clásica no era capaz de explicar por qué la capacidad calorífica varía en función de la temperatura. A estas dos "nubecillas", con derecho, se habría podido añadir una más: el problema de la radiación térmica. Para explicar los experimentos de Michelson se necesitó crear la teoría especial de la relatividad. Una revisión no menos radical de las concepciones físicas resultó necesaria también para la resolución de los dos otros problemas: en este ámbito se logró alcanzar el éxito tan sólo después de la creación de la teoría cuántica. Hablare-



mos más detalladamente sobre la radiación térmica.

A los físicos no asombraba el hecho de que todos los cuerpos calientes emiten ondas electromagnéticas. Lo único que se requirió fue aprender a describir cuantitativamente este fenómeno, basándose en el armonioso sistema de las ecuaciones de Maxwell y en las leyes de la mecánica de Newton. Rayleigh y Jeans, en el proceso de resolución de este problema, llegaron a un resultado sorprendente y paradójico. De la teoría se desprendía de una forma absolutamente infalible que, por ejemplo, incluso el cuerpo humano con la temperatura de 36,6° C tendría que brillar con un resplandor deslumbrante, perdiendo en este caso inminentemente la energía y enfriándose con rapidez casi hasta el cero absoluto.

Aquí no se necesita ningún experimento fino para convencerse del conflicto expreso entre la teoría y la realidad. Pero, repetimos, al mismo tiempo los cálculos de Rayleigh y Jeans no daban

lugar a ninguna duda. Eran corolario directo de los enunciados más generales de la teoría. No había ardid alguno que pudiera salvar la situación.

El hecho de que las leyes del electromagnetismo múltiplemente comprobadas se "declararon en huelga", apenas se hizo el intento de aplicarlas al problema de la radiación de las ondas electromagnéticas cortas dejó tan perplejos a los físicos que éstos comenzaron a hablar sobre la "catástrofe ultravioleta"*. Sin embargo, en aquella época, a muchos físicos parecía que el problema de la radiación térmica es una pequeña cuestión particular que carecía de importancia sobre el fondo de los gigantescos alcances generales.

Sin embargo, el destino dispuso que esta "nubecilla" iba acrecentándose hasta convertirse en una nube gigantesca la cual, eclipsando todo el horizonte científico, se descargó en un chaparrón que dejó derrubiado todo el fundamento de la física clásica. Pero, al mismo, tiempo, este aguacero despertó a la vida una nueva concepción física del mundo que designamos ahora brevemente con dos palabras: "teoría cuántica".

Antes de proceder a relatar sobre aquello nuevo que en una medida considerable trastornó nuestras ideas tanto acerca de las fuerzas electromagnéticas, como acerca de las fuerzas en general, dirijamos nuestra mirada hacia lo anterior, intentando desde la altura que hemos alcanzado figurarnos con nitidez por qué, en fin de cuentas, a las fuerzas electromagnéticas pertenece en la naturaleza un papel tan relevante.

---

* La "catástrofe" recibió el nombre de "ultravioleta" debido a que los contratiempos estaban vinculados con la radiación de ondas muy cortas.

6. ¿Por qué concede a las interacciones electromagnéticas el mayor espacio en el libro?

¿Por qué dos capítulos mayores del libro están dedicados a la descripción de las fuerzas electromagnéticas?

Evidentemente, porque las fuerzas electromagnéticas son las más difundidas en la naturaleza.

El caleidoscopio abigarrado y, tal vez, algo embrollado de este capítulo es un testimonio indiscutible de esta circunstancia.

¿Pero dónde reside la causa de la diversidad extraordinaria de las manifestaciones de las fuerzas electromagnéticas? ¿Por qué la naturaleza puso a su disposición de la más amplia palestra de actividad? La respuesta a la segunda pregunta se contiene, parcialmente, en el planteamiento de la primera. Sin duda alguna, la diversidad de las formas de las interacciones electromagnéticas contribuye a su participación en los más distintos procesos de la naturaleza viva e inanimada.

No nos proponemos ahora a contar al lector algo nuevo. Sobre la base de lo leído es posible contestar a las cuestiones planteadas. Abandonen por un momento el libro y reflexionen, ante todo, sobre la causa de la diversidad de las fuerzas electromagnéticas.

¿Han reflexionado ya? Entonces, piensen si han tomado en consideración todos los factores.

Evidentemente, uno de los factores más importantes de la diversidad de las fuerzas es la existencia de las cargas de dos tipos: positivas y negativas. Debido a esta circunstancia es posible tanto la atracción, como la repulsión. Si la carga positiva es igual a la negativa, los cuerpos no manifiestan interacción a distancias hasta cierta medida considerables. Las fuerzas electromagné-

ticas las cuales, por su naturaleza, son de acción a distancia pueden ser también de corto alcance.

Otro factor del que no se puede prescindir es la relativa complejidad de las leyes de las interacciones electromagnéticas.

A diferencia de las fuerzas gravitacionales, las electromagnéticas *dependen no sólo de las distancias entre las cargas, sino también de las velocidades de su movimiento*. Existe una interacción magnética especial que no tiene analogía en la teoría newtoniana de la gravitación.

Y, finalmente, durante la aceleración del cuerpo cargado se forman ondas electromagnéticas. *La interacción depende de las aceleraciones.*

No obstante, poco valor tendría la diversidad de las manifestaciones del campo electromagnético, si todos los cuerpos no estuvieran estructurados de partículas eléctricamente cargadas. *Las partes constituyentes más importantes del átomo —el núcleo y los electrones— son portadores de la carga eléctrica.*

La carga gravitacional (masa) es inherente a odas las partículas sin excepción, pero las fuerzas de la gravedad son extremadamente débiles y en absoluto, no son capaces de competir en el interior de los pedazos de sustancia con las poderosas fuerzas electromagnéticas.

Una intensidad aún mayor la tienen las interacciones nucleares. Sin embargo, éstas están en condiciones de funcionar tan sólo a distancias sumamente cortas. Las fuerzas electromagnéticas, incluso entre los sistemas nuetros, superan incomparablemente las nucleares en cuanto a la acción a distancia, y las fuerzas entre los cuerpos cargados tendrán el carácter de acción a distancia no en menor grado que las de la gravitación universal, De una manera todavía más lenta disminuyen con la distancia las interac-

ciones efectuadas por medio de las ondas electromagnéticas.

Las causas enumeradas bastan para convertir las fuerzas electromagnéticas en las más "solicitadas" fuerzas de la naturaleza.

7. Adición que tiene todos los derechos a ser un capítulo

Hemos dado el nombre de adición que tiene todos los derechos a ser un capítulo a la parte final del mismo. Sí, podemos confirmarlo. Si quisiéramos ser estrictos y puntuales, tendríamos que desarrollar esta adición convirtiéndola en un capítulo aparte (o, tal vez, incluso en un libro entero) y poner este capítulo a la cabeza de todos los demás. Es que abordaremos el tema sobre las leyes que reinan en el mundo de las partículas elementales de las cuales están estructurados todos los objetos que nos rodean. Precisamente las leyes de la interacción de estas partículas determinan, en fin de cuentas, las "fuerzas en la naturaleza" de las cuales hablamos. Ahora bien, si, a pesar de todo, decidimos no comenzar con un capítulo de este tipo, sino lo sustituimos por una modesta adición, lo hicimos debido a muchas causas: el camino desde lo complicado hasta lo simple dista mucho de ser siempre el mejor; el estudio de las matemáticas se inicia por la aritmética y no por las integrales; ¿qué necesidad se tiene de atemorizar al lector desde el mismo principio?, etc.; y, finalmente, ¿acaso es una cosa muy buena ser puntual hasta exagerar?

También teníamos otra razón de bastante peso. Una idea física puede apreciarse en su justo valor solamente en el caso de que se entiende la lógica intrínseca de su aparición, así como el lugar que

ocupa en la cadena general de la cognición de las leyes de la naturaleza.

Así, pues, ahora, cuando hemos terminado el relato acerca de las fuerzas electromagnéticas en su interpertación clásica, estamos en condiciones de decir: antes de seguir hablando sobre las fuerzas en la naturaleza, tenemos que abrir indispensablemente una nueva puerta detrás de la cual comienza aquella región asombrosa y a veces paradójica que lleva el nombre de *micromundo*.

Lo discontinuo en lo continuo

La ciencia posee su simbolismo. La palabra "cuanto" nació, o mejor dicho, obtuvo la carta de naturaleza en la ciencia junto con el siglo XX. Y a cualquier persona que se interese por la "biografía de las ideas" la historia de su nacimiento no puede dejar de parecer emocionante y hasta trágica.

Max Planck fue un científico ya completamente maduro cuando le atrajo el problema de irradiación de las ondas electromagnéticas por los cuerpos calientes. La formación de Planck, al igual que de otros científicos de su generación transcurrió totalmente bajo la influencia de aquel cuadro del mundo, majestuoso y, al parecer, plenamente acabado, que se denomina física clásica. El sólido fundamento de ésta lo constituía el concepto newtoniano del movimiento, y ni siquiera el tempestuoso desarrollo de la teoría del campo electromagnético introdujo cambios radicales en su carácter armónico y consumado.

Sin embargo, la popia ciencia es el movimiento perpetuo. En ésta maduran las fuerzas que derriban cualesquiera teorías "consumadas". Y las manos de Max Planck, clásico en el sentido más amplio de esta palabra, abrieron la prime-



ra brecha en el bastión de la física clásica*. Resultó una brecha cuyo destino era ampliarse y a través de la cual irrumpió pronto un torrente tal de ideas nuevas que ni el propio Planck pudiera prever. Por lo visto, él mismo, hasta el propio fin de su larga vida no pudo, en realidad, avenirse del todo a estas ideas.

¿Pero en qué consistía el descubrimiento de Planck?

Como recordará el lector, de modo completamente inesperado para los físicos, la teoría de la radiación térmica que parecía la más estricta, conducía a resultados evidentemente absurdos, como, por ejemplo, el que el cuerpo humano debe emitir luz brillante. En búsqueda de eliminar esta divergencia manifiesta entre la experiencia y la teoría, Planck demostró que todas las dificultades desaparecían si sólo se suponía que los átomos irradiaban la energía electromagnética por porciones aisladas que recibieron el nombre de *cuantos*. Fíjense que estas "porciones" no derivaban, en modo alguno, de la electrodinámica

---

* Los trabajos de Planck dedicados a la teoría de la radiación aparecieron en 1900. La teoría de relatividad fue creada en 1905.

clásica de Maxwell. Más aún, eran para ésta un cuerpo completamente extraño.

El gran mérito de Planck consistía en que éste fue el primero en comprender la necesidad de hacer un *salto lógico*, admitiendo una hipótesis que *contradecía* la electrodinámica de Maxwell, para lograr la explicación de los hechos experimentales. Era imprescindible, en cierto punto, ir en contra de la teoría clásica. ¿Acaso carecía de precisión algo en la interacción de la luz con las cargas o, incluso, en las propias leyes que regían las ondas electromagnéticas? Planck no lo sabía. Él estableció el hecho. Y no sabía explicarlo. Mientras tanto, los acontecimientos se desarrollaban de una forma tempestuosa.

El hecho de que la luz se emite por porciones no lleva implícito que la estructura del propio rayo luminoso es discontinua. "Si la cerveza siempre se vende en botellas de una pinta de capacidad —decía Einstein— de aquí no deriva, ni mucho menos, que la cerveza consta de partes indivisibles iguales a una pinta". Sin embargo, los experimentos para arrancar de la sustancia los electrones por medio de la luz, indicaban con insistencia que la luz es absorbida también solamente por porciones individuales. *La porción irradiada de energía luminosa conserva su individualidad también en lo sucesivo.*

Por primera vez, esta idea fue enunciada por Einstein en 1905. En el "punto de vista heurístico" desarrollado por él, la luz siempre parece componerse de porciones individuales poseedoras de energía e impulso. La porción de la luz resulta inesperadamente muy similar a aquello que antes siempre se asociaba con una partícula.

Estas propiedades de la luz comenzaron a llamarse precisamente así: "corpusculares" ("corpúsculo" significa "cuerpo muy pequeño", "par-

tícula"), y la correspondiente "partícula de la luz" recibió el nombre de "fotón".

¡La luz y todas las ondas electromagnéticas en general, acusan las propiedades de corpúsculos! ¿Acaso es posible semejante cosa? ¡Es que con las ondas electromagnéticas se vincula sólidamente la concepción de una materia distribuida, extendida en el espacio!

Si a cualquier lector se pregunta, por qué la transmisión de una sola estación de radio se puede escuchar al mismo tiempo por multitud de receptores ubicados en diferentes lugares, la respuesta será, a lo mejor, la siguiente: porque las ondas que parten del transmisor barren un área muy grande.

Sin embargo, esta respuesta, en general correcta, toca tan sólo un aspecto del fenómeno. Aquel aspecto en que se manifiesta la continuidad.

Pero, por otra parte, ¿cómo reconciliar esta tesis con el carácter parcial y las concepciones cuánticas? Pues, de acuerdo con estas últimas las ondas tanto se emiten, como se absorben por porciones, por cuantos. Y cada una de estas porciones no puede "dividirse en partes": el receptor la absorbe por completo, o bien, no la absorbe, en general.

¡Mas nosotros escuchamos toda la transmisión entera, y no sus retazos aislados que se nos ingeniamos a arrebatar de los vecinos!

Se sobreentiende que aquí no hay ninguna paradoja. La energía del cuanto depende de la frecuencia: es igual al producto de esta frecuencia por la célebre constante universal de Planck h*. Incluso para las ondas radioeléctricas cor-

---

* Ya nos hemos encontrado con esta magnitud, aunque, por cierto, en una notación algo distinta, a saber: $\hbar$. Esta notación se utiliza para mayor brevedad y significa $\hbar = h/2\pi$.

tas este producto es extremadamente pequeño. Por consiguiente, al enviar al éter una energía lo suficientemente grande, el transmisor arroja sin interrupción una cantidad ingente de cuantos. Basta para todo el mundo. De la misma manera, cuando sopla el viento no tenemos la sensación de que nuestro rostro experimenta el impacto de una masa de moléculas. Todos los impactos confluyen en una sola sensación del suave empuje del aire.

Sin embargo, no siempre tiene lugar este allanamiento. Y no sólo los instrumentos en los experimentos especialmente realizados, sino también nuestros órganos de los sentidos son capaces de descubrirlo.

En los admirables experimentos de S. I. Vavílov se estableció, por ejemplo, que el ojo humano, este "instrumento" más sutil de nuestro organismo, es capaz de reaccionar a una diferencia de varias decenas de cuantos de luz.

Sería absurdo (y, quizá, ahora no haya necesidad de ello) incluso enumerar todos los experimentos los cuales confirman incuestionablemente que en los fenómenos electromagnéticos se manifiestan con nitidez tanto las propiedades ondulatorias (es decir, aquellas que, al parecer, de modo categórico testimonian la continuidad), como las corpusculares (o sea, aquellas con las cuales, con el mismo grado categórico, es preciciso relacionar algo discreto, discontinuo).

Aquí se cae de su peso una posibilidad al parecer seductora. Recuerde el vientecillo del que acabamos de hablar. Es que en él (o bien, un ejemplo aún más palmario, en las ondas sonoras), en fin de cuentas, todo se reduce también al movimiento de los corpúsculos: moléculas. Y tan sólo el cuadro general promediado de su movimiento crea el fenómeno que se percibe como onda o viento. ¿Puede ser entonces, que también

las partículas luminosas, los fotones, vuelan como lo deben hacer las honestas partículas corrientes y molientes? ¿Acaso, disponiéndose en algunos sitios más densamente y en otros, menos, éstas forman lo que nosotros llamamos onda electromagnética? ¿Verdad que es una mala explicación? Vano empeño el nuestro.

Los experimentos que no dejaban, absolutamente, lugar a dudas demostraron que las propiedades ondulatorias se manifiestan incluso en el caso de que se trata de un solo fotón. ¡Incluso de un solo! Aquí hay en qué pensar.

Sin embargo, lo expuesto no es sino una parte pequeña de los enigmas que la naturaleza planteó ante los investigadores.

Dualidad de las ondas y las partículas

Si bien con el campo electromagnético (en todo caso, antes de aparecer la teoría cuántica) siempre se vinculaba la idea sobre la materia distribuida continuamente en el espacio, los electrones, en cambio, durante un largo período se figuraban a los físicos como ciertos ovillos minúsculos de materia. Esta circunstancia la recalcaba el nombre mismo de "partícula" que



acompañaba constantemente la palabra "electrón". En fin de cuentas, la partícula es meramente el punto material newtoniano. Es así como concebía el electrón la mayoría de los investigadores. Cabe señalar que en muchas ocasiones esta concepción ofrecía la posibilidad de comprender a fondo fenómenos muy importantes. Ya nos referimos a algunos de ellos al relatar sobre las fuerzas electromagnéticas en acción.

He aquí que poco a poco todo el mundo *comenzó a olvidar que muchos rasgos en el "retrato clásico"* del electrón aparecieron, por decirlo así, como adelanto. A éstos se acostumbraron. Para muchos dichos rasgos llegaron a ser casi sobreentendidos y la renuncia a los mismos transcurría de una forma muy penosa. Sin embargo, la necesidad de esta renuncia se hacía cada vez más evidente. Se acumulaba cada vez mayor cantidad de datos testimoniando que la teoría electrónica clásica, aunque en una serie de casos ofrece una descripción cualitativa buena, dista mucho de ser irreprochable cuando se trata de una descripción cuantitativa. Más aún, a veces esta teoría, en general, conducía a unas deducciones extrañas y paradójicas. Acuérdense, por ejemplo, del problema ya mencionado sobre la irradiación de ondas electromagnéticas por los cuerpos calientes o del problema fundamental de la estructura de los átomos.

Cada día se hacía más claro que estaba madurando una crisis llamada a revisar radicalmente los conceptos viejos y arraigados.

Y he aquí que en 1923, Luis de Broglie, físico francés, en aquel entonces joven, intervino con la idea tan insólita y, al parecer, tan paradójica, que se encontró más de una persona que la acogió con ironía. De Broglie enunció la hipótesis de acuerdo con la cual tanto el *electrón, como otras partículas cualesquiera deben poseer propie-*

dades ondulatorias a la par de corpusculares. En otras palabras, la situación que se creó ya para las ondas electromagnéticas se extendía a todos los tipos de materia, sin excepción.

Pero la ironía de los escépticos no duró mucho. Transcurrió un lapso breve y por la existencia en el electrón de propiedades ondulatorias votó el más prestigioso de los árbitros: ¡la experiencia!

Quedó demostrado que los electrones, al reflejarse del cristal, se comportaban absolutamente de tal manera como convenía a las más respetables ondas.

Ya fue imposible poner en tela de juicio el hecho de que tanto las propiedades corpusculares, como las ondulatorias existen en la materia en cualesquiera de sus manifestaciones.

En la ciencia entró la idea sobre la llamada dualidad onda — corpúsculo.

¿Qué es, entonces, la dualidad onda—corpúsculo? La palabra "dualidad" significa la condición de reunir en una misma cosa dos cualidades distintas. Tanto la luz, como los electrones revelan las propiedades de partículas (corpúsculos) y de ondas, o sea, propiedades que, al parecer, se excluyen recíprocamente.

Pero, ¿acaso puede el electrón (para ser más concretos vamos a hablar sobre éste) ser simultáneamente una partícula y una onda? ¡Es que nosotros mismos acabamos de subrayar la incompatibilidad de estas dos imágenes!

Por lo visto, tenemos que contestar: no, no puede. ¿En consecuencia...?

En consecuencia, al decir que el electrón es tanto una onda, como una partícula, hemos reconocido con ello que, estrictamente hablando, éste no es ni lo uno ni lo otro; no es ni partícula, en el sentido habitual de la palabra, ni onda. (Lo mismo se refiere al fotón.) Todas las

partículas son, si se quiere, centauros del micromundo.

Y si bien, a pesar de todo, empleamos los términos "onda" y "partícula", éstos se deben comprender en el sentido de que el electrón, por ejemplo, sólo aproximadamente puede describirse como partícula. ¿Qué significa "aproximadamente"?

Relación de incertidumbre

Cuando se dice "partícula", "punto material", en la imaginación surge un pedacito de sustancia que se encuentra en un lugar determinado (en el momento dado del tiempo) y que se mueve con una velocidad determinada. En el lenguaje físico más acostumbrado esto quiere decir que se pueden prefijar con absoluta exactitud las coordenadas y las velocidades (o impulsos que son el producto de la masa por la velocidad) de la partícula.

Al decir que el electrón sólo aproximadamente puede considerarse como punto material, teníamos en cuenta que las coordenadas e impulsos pueden prefijarse tan sólo de un modo aproximado, con cierto error. Cuantitativamente, esto se expresa por la famosa relación de incertidumbre (o de indeterminación) de Heisenberg. La relación de Heisenberg expresa la importante circunstancia de que con cuanta mayor precisión está determinado, por ejemplo, el impulso, tanta mayor inexactitud existirá en la determinación de la coordenada. Nos será conveniente escribirlo en forma de una relación simple. Designemos por medio de Δx la indeterminación de la coordenada, y por medio de Δp, la indeterminación con la cual se fija el impulso. Entonces la relación de incertidumbre se expresará en la

forma

$$\Delta p \gtrsim \frac{h}{\Delta x},$$

donde h es la constante de Planck.

Una relación similar liga la inexactitud de la energía y la indeterminación del intervalo de tiempo en cuyo curso se desarrolla el proceso:

$$\Delta E \gtrsim \frac{h}{\Delta t}\ .$$

Insertamos las relaciones de indeterminación sin su deducción detallada. Una deducción de este tipo requeriría de nosotros hacer una incursión demasiado profunda en el territorio de los microfenómenos, y esta incursión no la emprenderemos.

Ondas de probalidad

Así, pues, la partícula en la mecánica cuántica no es, en modo alguno, una bolita ordinaria, aunque sea de dimensiones superpequeñas. No posee simultáneamente valores determinados de coordenadas e impulsos; y sí posee propiedades ondulatorias.

¿Qué ondas son éstas? Se debe esperar que no puedan ser ondas de la mecánica clásica, por ejemplo, tales como las ondas sonoras. Una onda vinculada con los electrones o con los fotones no se compone de multitud de partículas. Ya nos hemos referido a esta circunstancia.

Entonces, ¿puede ser que la propia partícula consta de la onda? ¿Puede ser que la materia que integra el electrón está distribuida en el espacio en forma de onda: forma cierto paquete de ondas?

No, tampoco es así. La onda, al chocar contra un obstáculo se desintegra en haces aislados que ya no vuelven a reunirse en un todo único.

Mientras tanto, el electrón no se fracciona cualesquiera que sean las condiciones y siempre se detecta como algo entero.

La solución del problema y, además una solución que resultó inesperada para todos los físicos, fue hallada por Max Born. La onda relacionada con el electrón no es una onda material ordinaria de la física clásica. ¡Es una onda de probabilidad! La amplitud de esta onda (más exactamente, su cuadrado) no determina la densidad de la materia del electrón en el punto dado del espacio, sino la probabilidad de que el electrón podrá hallarse aquí si se realiza el experimento correspondiente. En el micromundo nos encontramos de un modo sorprendente con las leyes probabilísticas del movimiento de las partículas individuales.

En el mundo de los cuerpos grandes actúan las leyes de la mecánica de Newton que determinan unívocamente los detalles más pequeños del comportamiento de estos cuerpos. Ahora bien, como se puso de manifiesto, el electrón y otras partículas elementales se rigen en su movimiento por otras leyes. Dichas leyes no imponen al electrón un comportamiento estrictamente unívoco.

Por ejemplo, si el electrón vuela a través de una ranura, la teoría no permite determinar, de una forma unívoca, si éste va a dirigir su vuelo a la izquierda o a la derecha. Sólo se puede hallar el valor relativo de las probabilidades de estos acontecimientos.

El descubrimiento de las leyes probabilísticas (o estadísticas) del movimiento de partículas elementales individuales es uno de los resultados más asombrosos obtenidos en todas las épocas por los científicos. Es que antes existía la seguridad de que las leyes estadísticas se refieren tan sólo a la descripción de sistemas compuestos de un número muy grande de partículas.

Los autores comprenden, por supuesto, muy bien que los hechos tan inusitados requieren un relato mucho más pormenorizado. Sin embargo, nuestra finalidad, como ya hemos subrayado reiteradas veces con anterioridad, es relatar sobre las fuerzas en la naturaleza y no sobre las leyes del movimiento. Por esta razón nos limitaremos a lo expuesto.

Retornemos ahora a la relación de incertidumbre, deteniéndonos en algunos de sus corolarios que saltan a la vista.

Algunos corolarios

En primer término, trataremos de disipar la perplejidad que, a todas luces, ya embargó a muchos de nuestros lectores. Si a cada partícula y a cada pedacito de sustancia son inherentes propiedades ondulatorias, ¿por qué no descubrimos semejantes propiedades en la mesa junto a la cual estamos sentados, en el libro que leemos y, en general, en ninguno de los objetos con los cuales nos encontramos constantemente?

La respuesta es sencilla: porque son pesados. Su masa es grande, y, por consiguiente, para una indeterminación absolutamente despreciable de la velocidad, la incertidumbre de la coordenada puede considerarse prácticamente igual a cero. Un pedazo de sustancia, no de una forma aproximada, sino con precisión, puede considerarse un cuerpo que no acusa ningunas propiedades ondulatorias.

Solamente en el caso de masas pequeñas, es decir, cuando el objeto de investigación lo son partículas elementales individuales (o sus conjuntos pequeños) la incertidumbre llega a adquirir un carácter de principio y no se puede hacer de ésta caso omiso.

Tampoco se puede despreciar el hecho de que

pierde el sentido tal concepto como trayectoria: es imposible, simultáneamente, prefijar tanto la posición, como la velocidad.

En resumen, no se puede preterir el hecho fundamental: *la descripción newtoniana del movimiento llega a ser imposible.* Para nosotros esta tesis es de especial importancia también en otro aspecto: la definición del concepto "fuerza", como lo hemos recalcado, es rigurosa solamente en la mecánica de Newton. Ahora bien, si nos hemos convencido ahora de que en el micromundo se torna imposible la descripción newtoniana del movimiento, entonces, no se puede dejar de sacar también la siguiente conclusión lógicamente inevitable: al estudiar los fenómenos del micromundo *es necesario renunciar a las fuerzas como criterio de interacción.* Lo hemos señalado ya en la introducción.

¿Qué nos queda, entonces? Nos queda la energía de la interacción. La energía resultó (aquí se manifiesta la profundidad y la universalidad de la ley de conservación de la energía) mucho más viable que la fuerza, y la energía toma sobre sí toda la carga durante la descripción de las influencias mutuas que tienen lugar en los microfenómenos.

El principio de indeterminación y el libro sobre la mesa

La relación de incertidumbre ayuda a comprender una multitud de fenómenos más diversos, con la particularidad de que permite comprenderlos sin adentrarse en el mecanismo de los fenómenos y sin examinar detalladamente el carácter de la estructura de la sustancia y las fuerzas que actúan en su interior. He aquí, por ejemplo, nuestro viejo problema discutido con bastantes pormenores sobre el libro que no se

hunde a través de la mesa. Se pregunta, ¿por qué?

Apenas usted soltó el libro de sus manos éste comienza a caer por efecto de la atracción de la Tierra. En su camino se encuentra la mesa. Los átomos de ésta comienzan a apretarse, los electrones se acercan a los núcleos atómicos, concentrándose en volúmenes menores. De conformidad con el principio de indeterminación sus impulsos aumentan y, por consiguiente, también aumenta la energía. Aparece una fuerza que impide el movimiento del libro hacia abajo.

"La resistencia de los átomos a la compresión —observa con este motivo R. Feynman— no es un efecto clásico, sino mecánico-cuántico. De acuerdo con los conceptos clásicos se debía esperar que durante el acercamiento mutuo de los electrones con los protones la energía disminuyese; en la física clásica la disposición más ventajosa de las cargas positivas y negativas es cuando las mismas están unas sobre otras. La física clásica estaba bien enterada de este hecho que representaba un enigma: ¡es que los átomos sí que existían! Desde luego, también en aquella época los científicos inventaban diferentes métodos para salir del atolladero, ¡pero el auténtico (¡como esperamos!) lo hemos conocido solamente nosotros!"

La interacción y el balonvolea

Con la aparición de la teoría cuántica no sólo cambió el criterio de interacción, — el propio mecanismo suyo se presentó bajo un nuevo enfoque. El lector recordará cuán larga e insistentemente se buscó el intermediario en las interacciones de los cuerpos. Estas búsquedas, finalmente, llevaron a la afirmación del concepto del campo, en particular, del campo electromagnético. Sin embargo, como acabamos de señalar, el dua-

lismo onda—corpúsculo obliga a buscar los rasgos de discreto en lo continuo. El campo tiene también una faceta corpuscular. En consecuencia, también la interacción puede interpretarse desde el punto de vista corpuscular. Si anteriormente decíamos: una carga engendra el campo que actúa sobre la segunda carga, ahora tenemos fundamento para exteriorizarnos sobre lo mismo también así: *la primera carga crea (emite) cuantos, o sea, partículas-intermediarios que, después, se absorben por la segunda carga. Este intercambio de partículas intermedias como mecanismo de interacción es precisamente la "traducción al lenguaje cuántico" del anterior cuadro clásico.* Si antes la acción de unos cuerpos sobre otros despertaba asociaciones con ciertos hilos tendidos de uno de ellos al otro, ahora es más conveniente figurarnos algo a semejanza del juego de balonvolea entre las partículas.

Sin embargo, la nueva descripción de la interacción no es un mero trasiego del vino viejo en un odre nuevo. La interpretación cuántica destapa estratos enteros de nuevas posibilidades. En adelante veremos que es, literalmente, una revolución en la comprensión de la interacción. Pero antes de empezar la conversación sobre las nuevas posibilidades quisiéramos volver por un momento al principio de nuestro libro. ¿El lector se acordará de la discusión acerca de la acción próxima y la acción a distancia? Ya hace relativamente poco tiempo —a principios del siglo pasado— la propia necesidad de buscar a un "intermediario" en la interacción parecía a muchos problemática. Después, en la ciencia entró la noción sobre el campo como transportador de la interacción. Sin embargo, también el campo parecía a muchos una especie de ersatz-intermediario, pues demasiado profundo fue el abismo que lo separaba de la "auténtica" materia que

se describía por las leyes de la mecánica de Newton. Finalmente hemos hecho otro paso muy importante: nos hemos convencido de que el intermediario no sólo es material, poseyendo energía, impulso, etc., sino que también puede considerarse —con el mismo derecho (y exactitud) que los propios manantiales, la interacción entre los cuales dicho campo efectúa— como las partículas. Resultó que no había ningún abismo. Tanto aquello que entra en interacción, como aquello que la transporta se nos presentó como materia ordinaria y, en fin de cuentas, como "partículas" elementales. Y solamente las comillas en la palabra "partículas" nos hacen recordar el larguísimo camino que salvó la ciencia desde la descripción newtoniana del movimiento hasta la aparición de la idea sobre la dualidad onda-corpúsculo.

Pero, ¿a qué nuevas posibilidades hacemos alusión?

Vamos a preguntarnos: ¿es posible dejar el monopolio a la transferencia de la interacción tan sólo en las "manos" de las partículas del campo electromagnético? ¿Acaso también otras partículas (o sus grupos) pueden asumir el cargo de *transportadores de la interacción?*

La idea resultó ser muy interesante y fructífera, y más tarde, en particular, en el capítulo siguiente, volveremos a ésta. Mientras tanto por ahora destacaremos sólo dos momentos importantes.

El nuevo semblante de la carga

El primero de dichos momentos se refiere a la carga. A nuestra vieja conocida, la carga eléctrica. Cuanto mayor es ésta tanto más fuerte es su acción sobre las partículas cargadas que la rodean. En el "lenguaje cuántico" este hecho significa que cuanto mayor es la carga tanto

mayor número de cuantos transportadores de la interacción envía la fuente por todos los lados. Por consiguiente, ahora podemos decir que la carga es el criterio de actividad, de intensidad de emisión (y absorción), es fuente de cuantos intermedios.

Si estos últimos son cuantos del campo electromagnético, entonces la carga correspondiente es eléctrica. Mas, como ya hemos señalado, los cuantos-intermediarios pueden ser también otras partículas. De aquí se infiere que es necesario introducir también otros tipos de cargas. Para cada tipo de intermediario debe haber su carga y su constante de enlace.

¡Es una deducción importantísima!

Al revisar la tabla de las partículas elementales podemos probar, por turno, si cada partícula dada (o su grupo) sirve para interpretar el papel de intermediario. En este caso los criterios se reducen a no entrar en conflicto con las leyes de conservación. Sin embargo, la naturaleza impone también prohibiciones complementarias, de modo que en la realidad no tenemos que ver con una gran diversidad de tipos de interacciones, lo que se podía esperar a primera vista. El número de las posibles especies de "cargas" no es grande, ni mucho menos. La misión de nuestro libro consiste, en particular, precisamente en la enumeración y examen de todas las especies de éstas que conocemos. En el capítulo dedicado a las interacciones débiles retornaremos con mayor detalle a este problema.

Las metamorfosis en el reino de lo infinitamente pequeño

La conversación sobre las diferentes cargas no hizo abordar el tema que de por sí es de enorme importancia. Un poco antes escribimos que la

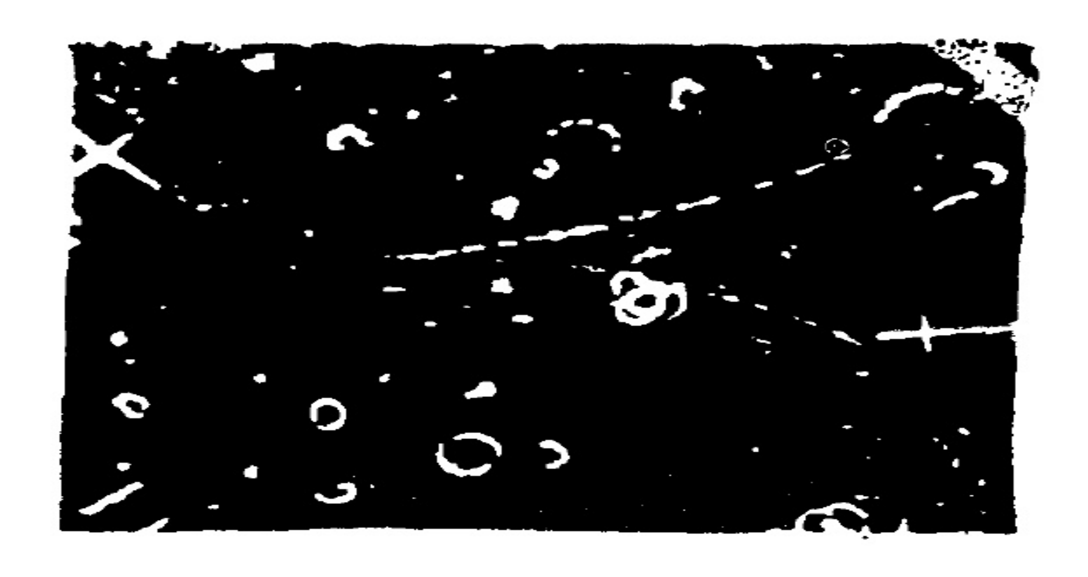
partícula (se trataba de una partícula que transfiere la interacción) se emite por una fuente. Pero, ¿qué significa "se emite"? No se puede figurar, por ejemplo, que todo sucede de la misma manera que cuando uno abre la portezuela y deja salir el pájaro de la jaula. Antes de haber sido emitida la partícula no se encontraba en el interior de la fuente ni se guardaba en una arqueta secreta. El fotón no se esconde en el átomo: él nace, se engendra en el propio acto de radiación.

¡Se engendra!

¿Por consiguiente, es posible la aparición (y, añadimos, la aniquilación) de partículas? Sí, precisamente a esta conclusión nos llevó la cadena de razonamientos. Pero, ¿no es que nos apresuramos con las deducciones? ¿Puede ser que el fotón es una anomalía, una partícula no típica? (Pues no es casual que de los fotones no pueda construirse aquello que en el sentido cotidiano y habitual lleva el nombre de sustancia.)

Estas dudas hasta el año 1927 tenían el terreno donde descansar. Y este año memorable para los físicos, apareció el trabajo del joven teórico inglés P. Dirac. Inició su trabajo tratando de escribir para el electrón una ecuación del movimiento tal que se correspondiese con los requerimientos de la teoría de la relatividad. Como ve el lector, era una tarea a primera vista bastante formal. Sin embargo, al cabo de un plazo muy breve (y, por cierto, no sin "fricciones" e "impulsos" por parte del experimento) quedó claro que este problema se podía resolver sólo suponiendo que el electrón tenía un "doble", o sea, una partícula semejante al electrón en todos los aspectos, pero con carga de signo opuesto. Esta partícula, en efecto, fue descubierta en la cámara de Wilson. Le dieron el nombre de positrón.

Al igual que el electrón, esta partícula tomada



por separado, es completamente estable: puede existir un tiempo tan largo como se quiera. No obstante, la teoría vaticinó que inmediatamente después de haberse encontrado tanto el electrón, como el positrón tendrían que desaparecer (aniquilarse), engendrando fotones de alta energía (cuantos γ). También puede desarrollarse el proceso inverso: el nacimiento del par electrón-positrón*. Por ejemplo, cuando un cuanto γ de suficiente energía choca contra un núcleo.

En la cámara de Wilson situada en el campo magnético este par deja una huella característica en forma de horquilla "bicorne".

Resultó que el electrón, este "patriarca" entre las partículas, el material de construcción más importante para los innumerables átomos, este seguro y probado electrón no era eterno. ¡Podía desaparecer! ¡Podía aparecer! Esta circunstancia conmovió a los físicos y, —después de que el experimento confirmó brillantemente las predicciones de la teoría— "produjo (según las palabras de un conocido teórico) la monstruosa sensación de bienestar".

* Está claro que no pueden nacer electrones solitarios, aunque sea por el hecho de que en este caso se infringiría la ley de conservación de la carga.

Probablemente ya hace mucho, la teoría no parecía tan omnipotente, y todos los secretos de la naturaleza tan accesibles.

En efecto, los trabajos de Dirac ocupan un lugar excepcional en la física moderna. No es de sorprender que el nombre de su autor estuviese rodeado de una aureola especial.

En los años en que los autores de este libro fueron todavía estudiantes, los físicos en sus veladas leían con frecuencia el "Cantar sobre el electrón".

¡Oh, Apolo! ¡De Zeus y Latona soberbio hijo!
¡Protector de Las Artes, tú que a los poetas inspiras!
Por tu mano guiado quisiera cantar el Amor,
El eterno Amor del que nacen belleza y vida.
Que mi cantar glorifique a Eros y Afrodita,
A la diosa, en aguas del mar de la blanca espuma nacida.
Y así, con palabras solemnes, yo doy el comienzo
Al relato verídico sobre aquel
Que por la voluntad de los dioses
El nombre glorioso de *Electrón* ostentaba,
Y, que, perturbando el éter, recorría los vastos espacios,
Menos veloz que la luz y a velocidad uniforme,
Cuando faltaba el campo externo.
En su derredor un sinnúmero de sus semejantes se desplazaba,
Mas, al mandato sumisos del dios poderoso Coulomb,
Apenas se acercaban tenían que despedirse,
Pues sólo repelerse podían estando en reposo, ¡y no atraerse!
Entonces, cansado de tanto sufrir,
Se quejó el primer electrón,
Que, peturbando el éter, recorría los vastos espacios,

Menos veloz que la luz y a velocidad uniforme,
Cuando faltaba el campo externo.
A otro dios poderoso, a Dirac, clamó
Con fervor y esperanza rezando.
"¡Oh, dios omnipotente! ¡Oh, dios, de grandeza invariante*:!
¡Tú que en mi ecuación el punto tercero pusiste**:!
¿Por qué, creador, despreciando las leyes mundanas,
Me destinaste a errar, me negaste el amor y la dicha?
¡Ten compasión de mí! ¡Hállame una compañera!"
Prestando oído atento a esta súplica suya
Y frunciendo temiblemente las cejas,
Proclamó, imperioso, el omnipotente Dirac:
"¡Que sea así!"
Y lanzando contra el núcleo un fotón
Con $h\nu$*** mayor que $2mc^2$,
Creó la primera pareja, anunciando con ello
El albor de la era feliz y nueva.
Y desde aquel desiciso y supremo instante
Cualquier electrón atómico, por más periférico que sea,
Al igual que tú, mi noble lector,
Y al igual que cada alma viviente,
Pudo echar al olvido todas sus cuitas y penas,
¡Por cuanto tenía ya su adorable compañera!

---

* Invariante significa el mismo en todos los sistemas de referencia.

** Se tiene en cuenta la fuerza del rozamiento de radiación, de la que hizo mención anteriormente, que viene condicionada por la interacción de la carga con su propio campo electromagnético. Esta fuerza se expresa por medio de la tercera derivada de las coordenadas respecto al tiempo.

*** Se lee: "hache nu"; es el producto de la constante de Planck por la frecuencia, lo que es igual a la energía del fotón.

Como la tuya es bella
Y menor es que cero nivel de su energía.
Y en cuanto al genio suyo
Nunca se puede reprocharla de ser constante.
Pero lo principal —y fíjate bien en ello—
Por su positividad, siempre será superior
al electrón su compañera.
Al terminar mi cantar, quisiera que éste suene
Como un himno a Eros, al dios del Amor,
El Amor sempiterno y ubicuo,
Que igualmente y sin distinguir se presenta
En la morada de los dioses y en una modesta
cabaña,
Que vive en el soplo del viento
Y en el palpitar de las hierbas,
Para todo el Universo una ley imperecedera
afirmando:
¡Sea que cada ψ su ψ* encuentre!*:

Uno de los ejemplares de este "Cantar" lleva el autógrafo de Pablo Adriano Mauricio Dirac.

P a m Dirac

О Аполлон, покровитель прекрасный искусства,
В сердце певца огонь вложив вдохновенья,
Дай мне воспеть во имя великого сына Латоны и Зевса
любовь —
Мать красоты и бессмертья сестру!

La idea sobre las partículas y antipartículas resultó extraordinariamente fructífera. Los "dobles" se encontraron para todas las partículas (aunque en unos casos excepcionales, como el

* Se lee: "psi" y "psi conjugado". Con estas letras se suele designar la "función de onda", o sea, la magnitud con cuya ayuda en la mecánica cuánica se describen las partícuas.

del fotón, la partícula y la antipartícula coinciden). Experimentalmente se descubrieron el antiprotón, el antineutrón, etc. Actualmente conocemos que el nacimiento de las parejas y la aniquilación no constituyen el monopolio de los electrones y positrones.

También se hizo comprensible otra cosa. Las *transformaciones mutuas*, es decir, la destrucción de unas partículas y la aparición de otras no obligatoriamente, ni mucho menos, se operan por la vía de nacimiento de parejas partículas— antipartículas y de su aniquilación. Las reacciones con las partículas elementales (el término se ha tomado de los químicos y resultó muy apropiado) son muy diversas, pero en éstas se pueden captar también rasgos comunes. Los choques de las partículas recuerdan el golpe del eslabón contra el pedernal. El "eslabón" es la partícula-proyectil que *posee una energía lo suficientemente grande*. De blanco o de "pedernal" también sirven partículas o grupos de partículas. El golpe "saca fuego", o sea, produce nuevas partículas "chispas". Al mismo tiempo dicho golpe destruye el pedernal y el eslabón. Cuanto más fuerte es el impacto, tanta mayor cantidad de "chispas" partículas puede formarse. A veces, su número alcanza varios centenares. Actualmente, se ha acumulado ya un enorme material experimental sobre el nacimiento de las partículas. Todos estos datos no dejan ni la más mínima duda: las partículas (todas, sin excepción) pueden tanto aparecer, como desaparecer.

¿Aparecer? ¿Desaparecer? Pero, ¿no es que esta tesis no contradice la más fundamental de las leyes de la naturaleza, la ley de conservación de la materia? ¿Acaso la materia puede reducirse a la nada y aparecer de la nada?

Se sobreentiende que no afirmamos nada semejante. Cuando en primavera las ramas desnu-

das de los árboles en el jardín se cubren de yemas y, luego, de hojas; cuando después, en otoño, de las ramas de los árboles cuelgan frutos pesados, ¿acaso se le puede ocurrir a alguien sospechar aquí una contradicción con la ley de conservación de la materia? Tanto las yemas, como las hojas y los frutos no aparecen de la "nada". En este caso tenemos ante nosotros uno de los innumerables eslabones del eviterno ciclo y de las transformaciones mutuas de la sustancia, de la materia en la naturaleza.

También cuando investigamos el nacimiento y la aniquilación de las partículas nos encontramos con la transición de la materia de una forma a otra, una transición muy disímil en cuanto a su aspecto exterior, pero, en fin de cuentas, profundamente afín. Aquí también se puede hablar sobre la transición de la materia de un estado a otro.

Durante la aniquilación del electrón y positrón la materia pasa de la forma electrón-positrónica a la electromagnética. Claro, no hay "desaparición" alguna. A propósito, en este caso (así como durante todos los otros procesos) se conservan la carga, la energía, el impulso, etc., lo que demuestra una vez más la necesidad de considerar todos estos fenómenos precisamente como transformaciones.

Lo manifiesto y lo recóndito

Todo lo expuesto sugiere la idea de que la materia debe describirse como un todo entero, examinando diferentes partículas como manifestaciones diversas de esta materia única. ¡Un camino seductor! Sin embargo, aunque se hacen intentos de construir tal teoría universal, es todavía temprano hablar sobre el éxito cardinal. Por ahora

no tenemos aún la posibilidad de "construir" las partículas. Por esta razón nos vemos obligados a limitar, por decirlo así, a una descripción exterior. Nuestra situación recuerda hoy aquella en que se vería un botánico si éste estudiase la vida de las plantas por varias fotografías: en una, el grano; en la siguiente, el brote; después, la flor, y, finalmente, otra vez el grano. Este botánico asimilaría firmemente que existen diferentes estados de la planta: grano, brote, flor. También estaría enterado de que éstos siguen unos tras otras en una secuencia determinada. Semejante conocimiento le permitiría hablar acerca de las leyes generales de las transformaciones. Pero es poco probable que las fotografías le permitan establecer la dinámica intrínseca del fenómeno.

El físico también tiene ante sus ojos una serie de "fotografías". En éstas se encuentra aquello que, de una forma algo convencional, denominamos partículas elementales. Esta denominación se justifica por el hecho de que hoy en día sabemos todavía poco sobre la estructura de dichas partículas.

Todas estas partículas se introducen en la teoría como algo tomado directamente de la experiencia. Desde luego, lo expuesto no se debe entender de un modo demasiado estrecho: aquí entran no solamente los valores de las cargas, de las masas, de los espines, etc., sino también los detalles sutiles de las leyes del movimiento. Semejante situación no es casual. Es que la teoría surge sobre el terreno del experimento. Y el experimento, en rasgos generales, tiene el siguiente aspecto: en el dispositivo registrador (puede figurar como tal la cámara de Wilson, la placa fotográfica, el sistema de contadores, etc.) se ve una o varias huellas de los haces de partículas primarias. Todos los detalles íntimos

de la interacción están ocultos del observador. Éste descubre tan sólo el resultado de la interacción, y otra vez en forma de huellas de las partículas secundarias. Por supuesto, no todo se ajusta a este esquema simple: algunos de los protagonistas no tienen cargas y ni siquiera dejan huellas. Sin embargo, captamos lo principal: el experimento nos proporciona tan sólo datos indirectos, basándose en los cuales es necesario adivinar el cuadro de las interacciones.

Una comparación. ¿No es, acaso, demasiado atrevida?

Por cuanto lo que vemos no son las propias interacciones, sino sólo su resultado, o sea, la transformación de unas partículas en otras (o bien, en las mismas, pero en otro estado), aparece la tendencia —y, añadimos, plenamente justificada— a reflejar esta situación en la teoría. Y, derivando de esta teoría, surge el cuadro físico en que el lugar central se concede a las partículas como a algo dado directamente por la experiencia. Para dilucidar nuestro pensamiento figurémonos por un momento que no sabemos nada acerca de la estructura molecular de las sustancias. En este caso, incluso un problema tan simple —según nuestro actual parecer— como el derretimiento del hielo, tendría a todas luces el siguiente aspecto. Los investigadores podrían estudiar pormenorizadamente las propiedades del hielo y las del agua. Subrayamos, estudiar por vía experimental. Puede ser, incluso, que al hielo le darían el nombre de una "esencia elemental", y al agua, otra. Seguidamente, basándose una vez más en el experimento, dichos investigadores formularían la siguiente ley: en las condiciones determinadas (es decir, en el

caso dado, a temperaturas y presión determinadas) el hielo se transforma en agua.

Se transforma, ¿pero de qué modo? ¿A costa de qué modificaciones intrínsecas, recónditas? Esta cosa no se puede poner en claro sin el cuadro molecular. Y he aquí que nuestros científicos se verían en la situación de la cual hemos dicho que ésta no da la posibilidad de comprender la dinámica intrínseca de los procesos. En fin de cuentas, también en el problema fundamental de las partículas elementales el asunto se reduce a que no sabemos las leyes intrínsecas de estas partículas. Esta circunstancia, precisamente, nos obliga a adoptarlas ahora en forma hecha, por decirlo así, describiendo toda la diversidad de los procesos en el micromundo tan sólo como la desaparición de las partículas "hechas" y el nacimiento de las nuevas.

No se debe pensar que semejante enfoque es pésimo. Los físicos con rastreadores expertos, y, al descifrar las huellas-trazas, lograron penetrar en la esencia de los efectos enmascarados con gran sutileza los cuales delataban las costumbres y propensiones de las partículas. En la actualidad no sólo sabemos orientarnos en las leyes del movimiento de las partículas libres, sino también conocemos mucho acerca de su interacción. Como ya se ha señalado, esta interacción, de acuerdo con las ideas modernas, se reduce a que la partícula intercambia con los vecinos los cuantos del campo-intermediario o los lanza y recibe, es decir, también intercambia partículas, pero de otra especie.

La naturaleza de los cuantos emitidos y absorbidos por la partícula se determina por la carga que esta partícula posee. Si la misma está cargada eléctricamente, entonces "tiene el permiso" para emitir y absorber fotones; si es poseedora de la llamada carga nuclear (de ésta

hablaremos más tarde), se le permite emitir y absorber mesones π, etc.*.

Cada uno de estos actos de emisión o absorción transforma la partícula de un estado en otro.

Interacción con el vacío

Hemos señalado que la interacción es el resultado del hecho de que una partícula emite cuantos, mientras que la otra los absorbe. ¿Y es posible para la partícula absorber los cuantos que ella misma ha emitido? ¿Por qué no? Por supuesto que puede. Estos procesos conducen a la interacción de la partícula consigo misma. Este mismo hecho se expresa, a veces, en otras palabras: se habla de la interacción de la partícula con el vacío. Por muy paradójico que esto suene, esta expresión es plenamente justificada. Es que cuando hablamos sobre la autoacción, se tiene en cuenta que existe cierta acción sobre la partícula incluso en el caso de que ésta se encuentra sola, en el caso de que alrededor de ella no hay (o puede no haber) ninguna otra partícula real. En otras palabras, cuando en torno suyo existe el vacío.

Actualmente, al vacío, en la física, se concede un lugar de honor. En los libros abundan las expresiones como "polarización del vacío", "correcciones de vacío", "oscilaciones de vacío" y otras muchas. Entre tanto, todavía hace poco se consideró absurdo hablar sobre las "propiedades del vacío". ¿Qué propiedades puede tener un sitio vacío? Es que las propiedades son algo

* Esta tesis no provoca ningún conflicto con la ley de conservación de la energía: la duración de los procesos Δt es muy pequeña y, de conformidad con la relación de certidumbre, el "ensanchamiento" de la energía, en correspondencia, debe ser grande.

inherente a la materia. Y en los lugares donde la materia falta...

¡Stop! Es aquí, precisamente, donde se encierra el quid de la cuestión. ¿Qué significan las palabras "la materia falta"?

"Simplemente, que no hay ni una sola partícula" —contestará el lector. ¡Mas el asunto no es tan sencillo, ni mucho menos! Cuando en los días primaverales comienza a crecer la hierba, ¿cómo se puede responder a la pregunta si ésta ya se tiene o no se tiene? La respuesta puede ser como sigue: "Cuando comience a verdear, cuando los brotes asomen a flor de tierra, entonces sí, existirá". Bueno, ¿y antes, cuando los brotes todavía no emergieron, cuando siguen llevando aún "vida subterránea"?

Al escuchar esta pregunta, nuestros interlocutores imaginarios podrán asegurar, indignados, que nos entragamos a elucubraciones escolásticas, discutiendo el problema de qué se denomina "ya hierba" y qué "aún no hierba". Y en cierto sentido tendrán razón. Pero en algunos aspectos no la tendrán. La hierba crecida la vemos y la percibimos directamente con nuestros órganos de los sentidos. Pero allí donde los brotes todavía no asomaron, el ojo no ve sino un campo desnudo, o sea, también el vacío, algo "huero", en una acepción determinada de esta palabra.

No se puede decir que esta analogía no pega ni con cola. Resulta que también en la teoría de las partículas elementales el vacío es posible comprender no como "nada absoluta", sino como un estado especial de todas las partículas cuando éstas tienen energía mínima, de modo que no se perciben directamente ni por cualesquiera instrumentos finísimos, sin hablar ya del ojo. Sin embargo, las partículas del vacío "sienten" la influencia de las "reales" y se reagrupan de cierta forma bajo su impacto (circunstancia que,

a propósito, conduce a efectos que se observan experimentalmente). *Si esta influencia es lo suficientemente enérgica, la partícula se hace pasar de su "estado invisible de vacío" al estado real común y corriete. Exteriormente, este paso tiene el aspecto de nacimiento de la partícula. De la misma manera, la aniquilación de las partículas puede considerarse como su transición al estado de vacío.*

Semejante método de descripción no sólo es posible, sino también en la teoría actual, resulta incluso plenamente natural, ya que permite, de acuerdo con lo expuesto antes y sin internarse en la dinámica intrínseca, describir sensillamente los procesos de nacimiento y aniquilación de las partículas, reduciéndolos a la transición de un estado a otro (aunque, por cierto, uno de los estados es algo exótico). Al introducir la concepción del vacío y hasta construir la "teoría del vacío", los físicos consiguieron grandes éxitos no sólo en la ordenación de su "hacienda teórica", sino también —y esto, desde luego, es lo más importante— en la descripción de los hechos experimentales. Con mayor precisión que antes se calculan los niveles de energía en los átomos, se han encontrado correcciones sustanciales para los valores de los momentos magnéticos de los electrones, etc.

Por supuesto, en las concepciones sobre el vacío físico no hay nada de místico. Meramente, se trata de que en la teoría cuántica del campo electromagnético las intensidades de los campos eléctrico y magnético, por una parte, y el número de fotones, por otra, no pueden tener simultáneamente valores determinados. Por esta razón, si el número de fotones es igual a cero —y semejante estado se denomina, precisamente, estado de vacío del campo electromagnético— las intensidades de los campos resultan ser no nulas,

sino indeterminadas, de modo que no podemos considerar el vacío como cierta nada "carente de personalidad".

El vacío fotónico ejerce una influencia sobre las partículas cargadas. Se debe tener presente, además, que la influencia de este vacío fotónico dista mucho de ser la única. He aquí otro ejemplo que esta vez atañe al vacío electrón-positrónico. Como en otros casos debido a la dispersión cuántica de energías, pueden engendrarse y, luego, muy pronto, aniquilarse pares virtuales de electrones-positrones. El campo electromagnético de las partículas cargadas perturba la distribución de estos pares virtuales. Dicho fenómeno recuerda el influjo del campo sobre la distribución de las cargas en los átomos de las sustancias, lo cual, como sabemos, condiciona la polarización. Por analogía se habla acerca de la "polarización del vacío electrón-positrónico" y, como consecuencia, acerca del apantallamiento de la carga que crea el campo.

La polarización del vacío, al igual que la interacción con el vacío del campo electromagnético da lugar a las correcciones en los valores de la energía de los electrones atómicos, etc. La teoría proporciona plena concordancia con el experimento dentro de los límites de su exactitud. Precisamente este hecho hace reconocer la realidad de los efectos de vacío. Sin embargo, la situación en la teoría está lejos de prosperar. La energía propia del electrón (y, por lo tanto, también su masa) condicionada por la interacción del campo electromagnético con el vacío (autoacción) resulta infinitamente grande. Está claro que el resultado es absurdo hasta abrumar. No menos absurda resulta ser también otra deducción de la teoría: la polarización del vacío electrón-positrónico debe conducir al total apantallamiento de la carga.

Pero, de ser así, ¿cómo se las ingenian, teniendo en cuenta las correcciones de vacío, obtener resultados finales concordantes con el experimento?

Esto se consigue con la ayuda de la llamada "técnica de renormación" de la carga y de la masa, una técnica que permite separar de las magnitudes infinitamente grandes las partes finitas —y (¡lo que es importante!) dependientes del estado— en correspondencia exacta con el experimento.

Todas las divergencias que surgen en la teoría cuántica de las acciones electromagnéticas resultan relacionadas tan sólo con la masa y la carga. Ésta es la causa de que se puede razonar de la siguiente forma. Por ahora no sabemos calcular las correcciones de vacío para la masa y la carga, no podemos determinar teóricamente m y e. Pero se conocen bien sus valores experimentales. Si en el resultado final de cualquier cálculo, en lugar de valores infinitos dados por la teoría se sustituyen los valores empíricos de m y e, entonces todos los resultados de los cálculos serán finitos. Este método de separación de los valores finitos para las magnitudes físicas lleva el nombre de método de renormación. Es interesante notar que, según la opinión de R. Feynman uno de los fundadores de la técnica de renormación, recurrir a este procedimiento no es sino "meter la basura bajo la alfombra". Está claro que aquí la situación no se puede corregir con medidas paliativas. Por lo visto, la nueva comprensión de la naturaleza de las partículas elementales nos hará revisar muchas cosas de aquellas que ahora nos parecen (¡ya!) tan acostumbradas y lógicas.

Y mientras tanto ... El "vacío" se nos dibuja como océano que llena todo en torno nuestro, del

que, a semejanza de seres fantasmagóricos emergen por aquí y por allí partículas.

El lector puede considerar que éste es el océano de lo inexplorado.

Su profundidad es infinita.

Seguramente, no una afición, sino un capítulo y hasta, repetimos, un libro nuevo, nos sería necesario para penetrar con la mirada un poco más en las profundidades de éste.

Fuerzas ingentes
Confluyeron en mundos.
Y se siente el aliento
De una vida prodigiosa.

A.V. Koltsov, *La gran palabra*

CAPÍTULO V

FUERZAS NUCLEARES

1. El núcleo y las partículas elementales

En la frontera de lo inexplorado

Núcleo atómico... Energética atómica... Siglo atómico... Estos términos, así como decenas de otros, de un modo o de otro vinculados con la palabra "núcleo", llenan las páginas de los periódicos, de los libros y de los artículos científicos, quitando a los hombres la tranquilidad y despertando en ellos tanto horror, como esperanzas. Se puede decir decididamente que nunca a ningunos descubrimientos científicos pertenecía un papel tan transcendental para toda la humanidad que a los descubrimientos en el campo de la física nuclear. Ni siquiera las personas apartadas del todo de la física pueden mantener respecto a éstos una conducta indiferente.

Pero, al mismo tiempo... al mismo tiempo, aquí, ante el investigador se extienden regiones enteras de manchas blancas. ¿Cómo es posible semejante cosa? —preguntará el lector perplejo. Es que ya hace mucho tiempo los científicos soviéticos conectaron los interruptores de la pri-

mera central eléctrica atómica; los rompehielos atómicos ya rompen los campos glaciales; ya se hicieron indispensables en las más diversas ramas de la producción —desde la metalurgia hasta la confección de adornos para los árboles de Navidad— los especialistas en física nuclear. ¿Cómo es posible, entonces, que una ciencia cuyos propios cimientos contienen ciertos (y no pocos) puntos oscuros haya llegado a ocupar un lugar tan enorme e importante? Por supuesto, aquí no



hay nada paradógico. Nos encontramos ahora en la situación, aproximadamente, de un albañil que sabe construir de los ladrillos un edificio, pero tiene una noción muy vaga acerca de muchas propiedades de los propios ladrillos y, puede ser, incluso acerca de cómo éstos se fabrican. A veces, refiriéndose a casos semejantes, se dice que hemos estudiado algunas propiedades, pero desconocemos la esencia. Tal vez esta expresión

no sea de lo más feliz para nuestro caso, pero refleja correctamente la circunstancia de que nosotros todavía no sabemos explicar, de una forma única, toda la multitud de los datos experimentales. Esta cosa no es de extrañar. La física nuclear plantea problemas cuya resolución depende directamente de la más fundamental de las cuestiones, la de la estructura de la materia en general, es decir, en fin de cuentas, de las partículas elementales. Estas partículas, a veces (de nuevo, se cae de su peso la misma comparación) se denominan ladrillos del Universo. Y es aquí donde nos encontramos en la situación de Carlos Linneo: no hemos avanzado mucho fuera de los límites de la sistemática. Nuestros conocimientos acerca de la "estructura" de estas partículas e incluso acerca de qué se entiende, hablando con propiedad, por la palabra "elemental" son todavía insuficientes.

Aquí pasa la frontera con la zona de lo inexplorado. Es una frontera inestable, sometida a acometimientos tempestuosos, pero aún no salvada por nadie, ni una sola vez, de un modo bastante radical. Por lo demás, en este aspecto la física nuclear no ocupa, en absoluto, un lugar especial. Basta con pensar a fondo y con atención sobre cualquier problema para que muy pronto la cadena de los "¿por qué?" derivados unos de otros nos lleve a la zona de lo ignoto. No en vano se dice que el hombre, al estudiar cualquier problema, atraviesa consecutivamente tres etapas: la primera, "todo se entiende"; la segunda, "todo es incomprensible", y la última, "algo se entiende".

¿De qué se componen los núcleos?

¿Por qué, a pesar de todo, el estudio del núcleo atómico nos obliga a ocuparnos de partículas elementales? Pues, al interesarnos, por ejemplo,

por el movimiento de los planetas los cuales, al fin y al cabo, también constan de partículas elementales, teníamos la posibilidad de no hacer especial hincapié en este problema.

La causa está completamente clara: en los núcleos de los átomos el número de partículas es tan pequeño que las propiedades de cada una de éstas, *por separado, no se promedian, no se nivelan*, sino, por el contrario, desempeñan un papel determinante.

Esto quiere decir que, a pesar de que nuestro objetivo final es construir un edificio, sea como fuere, tenemos que comenzar por los ladrillos. Esta circunstancia cobra para nosotros especial importancia porque, sin formar la idea acerca de la composición de los núcleos es imposible abordar el tema referente a las fuerzas intranucleares. Aquí, una vez más, la física nuclear nos plantea ante nosotros una nueva situación. En efecto, ni las fuerzas gravitacionales, ni (aunque en menor grado) las electromagnéticas demandaron un relato pormenorizado acerca de la estructura y la composición de los pedazos de sustancia participantes en la interacción. La "sustancia nuclear" es tan peculiar que es imposible separar la cuestión de "qué entra en interacción" de la de "cómo entra en interacción".

Una niña pequeña dijo que la hamaca es "muchos nudos atados por las cuerdas".

Esta expresión sirve para calificar muchas cosas. He aquí, por ejemplo, el átomo. Éste también consta de "nudos", núcleos, y electrones y "cuerdas", o sea, campos eléctricos que retienen todas estas partículas. Y nosotros, al contestar a la pregunta acerca de la composición del átomo, tampoco hacemos mención de estos campos siguiendo el hábito —que llegó a ser tradicional— de destacar aquello que está ligado, dejando en la sombra aquello *con qué* está ligado (¡dicha tra-

dición tiene sus raíces aún en la mecánica!). Sin embargo, cuando se trata del núcleo la situación cambia radicalmente. Aquí los propios "nudos", en cierta medida, están vinculados indisolublemente con las "cuerdas". Precisamente por esta razón nos hemos acordado de lo que dijo la niña sobre la hamaca.

Ahora el lector debe comprender con mayor claridad por qué, planteando como objetivo principal el relato sobre las fuerzas, tenemos que, a pesar de todo, comenzar contando cuál es la composición de los núcleos.

Los físicos conocen varias decenas de especies de partículas elementales más o menos estables*. Éstas se diferencian por sus masas, las cargas eléctricas y por otras, como se suele decir, propiedades intrínsecas. Al parecer, el surtido es rico y, a primera vista, la cantidad de material de construcción para los núcleos atómicos es más que suficiente. Bueno, figurémonos ahora que tenemos ante nosotros dos tablas: una tabla de núcleos y otra de partículas elementales. Si nos referimos a la masa, el núcleo más ligero lo tiene el átomo de hidrógeno**. Este núcleo es 1836,12 veces más pesado que el electrón y posee la carga igual a la de éste por su magnitud, pero opuesta por el signo (positiva). Entre las partículas elementales se encuentra una —el protón— que acusa absolutamente las mismas propiedades. Por consiguiente, hemos descifrado la composición de un núcleo. Pero con todos los demás núcleos los asuntos toman

---

* No tiene sentido precisar su número, por cuanto, por ahora, ni siquiera se ha aclarado definitivamente el propio criterio de la "elementalidad".

** La masa del átomo coincide prácticamente con la del núcleo: en el mejor de los casos la parte de los electrones constituye cerca de cinco centésimas de la unidad en tanto por ciento.

Tabla de partículas elementales

	Nombre	Símbolo: partícula	Símbolo: antipartícula	Masa	Espín	Carga eléctrica	Tiempo de vida, s	Productos principales de desintegración
	Fotón	γ	γ	0	1	0	Estable	
Leptones	Neutrino electrónico	ν_e	$\bar{\nu}_e$	0	1/2	0	Estable	
	Neutrino de mesón mu	ν_μ	$\bar{\nu}_\mu$	0	1/2	0	Estable	
	Neutrino de mesón tau	ν_τ	$\bar{\nu}_\tau$	0	1/2	0	Estable	
	Electrón	e^-	e^+	1	1/2	—1	Estable	
	Mesón mu	μ^-	μ^+	206,7	1/2	—1	$2,2 \cdot 10^{-6}$	$e^- + \nu_\mu + \bar{\nu}_e$
	Meson tau	τ^-	τ^+	3528	1/2	—1	$3,5 \cdot 10^{-12}$	$\mu^- + \bar{\nu}_\mu + \nu_\tau$
Mesones	Mesones pi	π^0	π^0	264,1	0	0	$0,8 \cdot 10^{-16}$	$2\gamma,\ \gamma + e^+ + e^-$
		π^+	π^-	273,1	0	1	$2,6 \cdot 10^{-8}$	$\mu^+ + \nu_\mu$
	Mesones K	K^+	K^-	966,4	0	1	$1,23 \cdot 10^{-8}$	$e^+ + \nu_e + \pi^0$

		K^0	$\bar{K}^0$	974,1	0	0	K_S^0, $0{,}86\cdot10^{-10}$ K_L^0, $5{,}38\cdot10^{-8}$	$\pi^+ + \pi^-$, $2\pi^0$ $\pi^0+\pi^++\pi^-$, $\pi^++e^-+\bar{\nu}_e$
	Mesón eta cero	η_0	η	1074	0	0	10^{-17}	2γ
Bariones	Protón	p	$\bar{p}$	1836,1	1/2	1	Estable	
	Neutrón	n	$\bar{n}$	1828,6	1/2	0	960	$p + e^- + \bar{\nu}_e$
	Hiperón lambda	Λ^0	$\bar{\Lambda}^0$	2184,1	1/2	0	$2{,}5\cdot10^{-10}$	$p + \pi^-$, $n + \pi^0$
	Hiperones sigma	Σ^+	$\bar{\Sigma}^+$	2327,6	1/2	1	$0{,}8\cdot10^{-10}$	$p + \pi^0$, $n + \pi^+$
		Σ^0	$\bar{\Sigma}^0$	2333,6	1/2	0	10^{-14}	$\Lambda^0 + \gamma$
		Σ^-	$\bar{\Sigma}^-$	2343,1	1/2	—1	$1{,}49\cdot10^{-10}$	$n + \pi^-$
	Hiperones xi	Ξ^0	$\bar{\Xi}^0$	2572,8	1/2	0	$3{,}03\cdot10^{-10}$	$\Lambda^0 + \pi^0$
		Ξ^-	$\bar{\Xi}^-$	2585,6	1/2	—1	$1{,}66\cdot10^{-10}$	$\Lambda^0 + \pi^-$
	Omega menos	Ω^-	$\bar{\Omega}^-$	3373	3/2	—1	$1{,}3\cdot10^{-10}$	$\Omega^- \to \Xi^0 + \pi^-$ $\Omega^- \to \Xi^- + \pi^0$ $\Omega^- \to \Lambda^0 + K^-$

Observaciones. La masa y el espín, así como el tiempo de vida de la antipartícula tienen los mismos valores que los de la partícula. La carga de la antipartícula es opuesta por el signo e igual por su valor absoluto a la de la partícula.

En la tabla no se han incluido los mesones pesados con el tiempo de vida relativamente corto y las resonancias, partículas de vida corta. Sobre éstas hablaremos más tarde.

El problema sobre la estabilidad del protón se ha puesto en tela de juicio.

otro cariz, no tan llano. He aquí, por ejemplo, el vecino más próximo del hidrógeno en el sistema periódico de los elementos de Mendeléiev, el helio. El núcleo de helio (por ahora, no hablaremos sobre los llamados isótopos) casi exactamente, es cuatro veces más pesado que el de hidrógeno. ¿Acaso éste se compone de cuatro protones? Pero, en este caso, su carga eléctrica también sería cuatro veces mayor que la del protón, sin embargo, en la realidad dicha carga es solamente dos veces mayor. ¿Puede ser que es posible eliminar esta dificultad admitiendo que en el núcleo, además de protones, se encuentran otras partículas cargadas negativamente que compensan la carga "sobrante"? Si, por añadidura, estas partículas poseen una masa pequeña, es posible, al parecer, atar los cabos. A primera vista, semejante posibilidad es seductora, más aún que la partícula idónea es nuestro viejo conocido, el electrón. A primera vista... Pero, ¿cuál es la razón, entonces, de que tanto los teóricos, como los experimentadores, unánimemente, se rebelaron contra este modelo electrónico-protónico? Sus argumentos eran bastante contundentes. Resulta que el electrón es una partícula demasiado ligera. Más tarde, tendremos que conocer este problema con más detalle.

En tanto ahora... ahora nos vemos convencidos de súbito, al contemplar la larga tabla de partículas elementales, que no viene al caso hablar sobre el "enorme surtido". Al parecer, ¡no hay de qué elegir! El asunto reside en que la tabla de partículas contiene una columna llamada "tiempo de vida". Éste oscila dentro unos límites sumamente amplios: desde mil segundos (aproximadamente) para el neutrón hasta, por ejemplo, un intervalo fantásticamente pequeño que se expresa con el número $0{,}8 \cdot 10^{-16}$ para la partícula que lleva el nombre de mesón pi cero

(se designa con π^0). Al expirar este "tiempo de vida" las partículas se desintegran, transformándose en otras.

Sin embargo, los átomos y, por lo tanto, también sus núcleos (por ejemplo, el mismo núcleo de helio) lejos de desintegrarse por sí mismos, se oponen decididamente a semejante acto. Son estables. Entonces, parece, ellos sean susceptibles de constituirse por partículas estables. No obstante, entre las partículas elementales no existe ninguna estable a excepción del protón y el antiprotón (excluyendo las partículas ligeras las cuales, como se ha señalado ya, no pueden acostumbrarse a vivir en el núcleo). ¡Ni una sola!

¿A qué hemos llegado, entonces? Una cosa queda clara: los núcleos no pueden constituirse únicamente por los protones. Ahora bien, las demás partículas sea son demasiado ligeras para figurar como partes constituyentes de los núcleos, sea son inestables. ¿Dónde se encuentra, entonces, la salida?

Acerca del sentido común

Es necesario decir con toda determinación que de no existir la mecánica cuántica nos veríamos completamente impotentes ante los enigmas que nos propone el núcleo. Aquí es donde se encuentra el reino de "microfísica" —en el pleno sentido de esta palabra— con todo aquello que, con frecuencia, parece paradójico desde el punto de vista de nuestras concepciones acostumbradas infundidas por las imágenes del mundo de objetos grandes. Nuestra intuición basada en la clásica evidencia" en lugar de ser el aliado del investigador se convierte aquí muchas veces en su enemigo.

Tomemos a título de ejemplo aunque sea la circunstancia ya mencionada de que las partículas ligeras —en todo caso, los electrones— no pueden ser partes integrantes del núcleo. La teoría clásica es incapaz de dar aquí explicación alguna. Sin embargo, si recordamos la relación de incertidumbre, no tendremos dificultad en llegar a comprender esta cuestión.

Los núcleos tienen dimensiones muy pequeñas. Los numerosos experimentos han demostrado que su tamaño constituye, aproximadamente, una cienmilmillonésima parte de milímetro. Por consiguiente, precisamente como tal se puede estimar la indeterminación de la coordenada de una partícula intranuclear. Este hecho ofrece la posibilidad de determinar inmediatamente la incertidumbre del impulso y, en consecuencia, por cuanto se conoce la masa de la partícula, también de la velocidad.

Hagamos un paso más: teniendo presente que la energía cinética es igual al semiproducto de la masa por el cuadrado de la velocidad hallaremos la dispersión en los valores de esta energía. Es fácil convencerse de que dicha dispersión es inversamente proporcional a la masa de las partículas. Para las partículas pesadas, por ejemplo, protones, la dispersión es relativamente pequeña, pero para los electrones ésta aumenta casi dos mil veces y llega a ser mucho mayor que la energía de enlace en los núcleos, conocida de la experiencia, es decir, de aquella energía con la cual entran en interacción las partículas intranucleares. Mas si la energía de enlace es menor que la cinética, esto quiere decir que las fuerzas de interacción son insuficientes para retener la partícula. Muy pronto, superando las interacciones, ésta abandonará el núcleo.

De aquí se desprende que incluso en el caso de que una partícula ligera, en virtud de ciertas cau-

sas, irrumpe en el núcleo, bastan las consideraciones energéticas por sí solas para demostrar que ésta no está en condiciones de avecindarse allí.

Otra vez sobre la composición

Así, pues, el material de construcción para los núcleos debe buscarse solamente entre partículas pesadas. En la tabla moderna, además del bien conocido protón, se tiene una cantidad bastante grande de tales partículas: en primer término, es el neutrón, así como un grupo numeroso de los llamados hiperones*.

Hablando en general, los hiperones sí pueden entrar en la composición del núcleo. En este caso se forman los llamados hiper-núcleos descubiertos en el experimento. Sin embargo, todos los hiper-núcleos son inestables: se desintegran con gran rapidez, lo que no es de extrañar, en modo alguno, puesto que la vida de los propios hiperones dura no más de una diezmillonésima fracción de segundo.

En nuestro almacén quedó una sola partícula: el neutrón. Los físicos conocen el neutrón hace relativamente mucho tiempo: éste fue descubierto por Chadwick, en aquel entonces joven científico, en el laboratorio de Rutherford todavía en 1932.

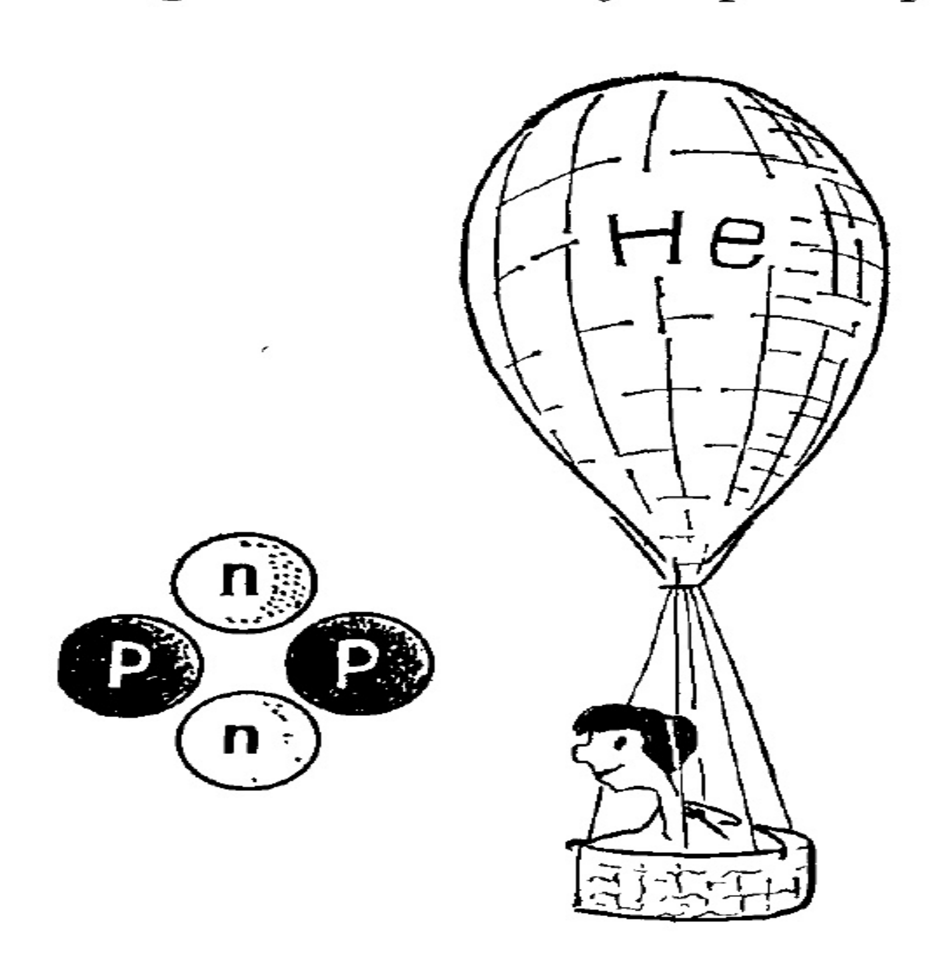
---

* No hablaremos sobre los antiprotones, antineutrones y otras antipartículas. Durante el encuentro de una antipartícula con la partícula (por ejemplo, el del antiprotón con el protón) —y semejantes encuentros son inevitables en nuestro mundo— tiene lugar el fenómeno que los físicos denominan aniquilación o desmaterialización. El par desaparece transfromándose en nuevas partículas. Debido a la aniquilación el núcleo que incluye tanto partículas como antipartículas no puede tener una vida larga.

Neutrón no posee carga eléctrica. Por su masa casi coincide con el protón (como ya se ha señalado, el protón es 1836 veces más pesado que el electrón, y el neutrón lo es 1839 veces, es decir, la diferencia es insignificante).

Modelo protónico-neutrónico

Partícula pesada neutra: ¿no es ésta la que a la par de protón entra en la composición de los núcleos? Por ejemplo, el núcleo de helio: éste tiene una carga dos veces mayor que la protónica,



mientras que su masa constituye casi exactamente el cuádruplo de la del protón. Si se supone que este núcleo contiene dos protones y dos neutrones, llegaremos precisamente al resultado ne-

cesario. Resultados magníficos se obtienen también para los núcleos de todos los otros elementos. No sólo la carga y la masa: todas las demás características también se encuentran en perfecta concordancia con el experimento.

El neutrón tan enérgicamente "aspira" a protagonizar el papel de partícula nuclear que por lo menos en dos países: en la Unión Soviética (Ivanenko) y, después, en Alemania (Heisenberg), prácticamente al mismo tiempo, apenas hubo aparecido la información acerca de los experimentos de Chadwick, se formularon las ideas principales referentes al modelo protónico-neutrónico del núcleo, modelo que hasta la fecha está admitido y reconocido por doquier.

Sin embargo, ¿cómo es posible reconciliar la estabilidad de los núcleos, por una parte, y la inestabilidad del neutrón, por otra? No olvide que aunque el neutrón, sobre el fondo de otras partículas, tiene el aspecto de relativamente muy estable, no se puede, sin más ni más, no tomar en consideración el hecho de que después de haber existido durante dieciséis minutos, aproximadamente, éste se desintegra. ¿De qué manera, entonces, puede explicarse el hecho incuestionable de que decenas de especies de núcleos viven más que dieciséis minutos, y un número considerable entre ellos existe, desde el punto de vista práctico, eternamente?

Lo inmutable en lo mutable

Estabilidad... ¿Y qué, hablando con propiedad, se oculta tras esta palabra? Es inmóvil el espejo de las aguas de un apacible estanque en el bosque. E igualmente inmóvil, como vidriado, parece a veces la catarata que se precipita de los peñascos. Pero tanto aquí, como allí tras la aparente inmovilidad y estabilidad se oculta

un movimiento intenso. De la superficie del agua se desprenden incesantemente moléculas: es la evaporación. Simultáneamente se desarrolla el proceso inverso: las moléculas de vapor son captadas por el agua. Si estos torrentes de moléculas — que van al encuentro uno al otro— son iguales, el nivel del agua no cambia, se mantiene el equilibrio. Cuando se trata de la catarata, se añade, además, el movimiento de toda la masa de agua, pero también aquí reina el equilibrio, por cuanto al lugar que ocupaba cada gota de agua fugada, viene una nueva, la cual, a su vez, es relevada por la siguiente.

Por consiguiente, la estabilidad y la durabilidad no significan, en modo alguno, la ausencia total del movimiento. Tan sólo una cosa es importante aquí: que el carácter de estos movimientos asegure la restitución ininterrumpida del sistema. En tales casos se habla del equilibrio dinámico, móvil. ¿No es que la estabilidad del núcleo es precisamente semejante estabilidad dinámica? Evidentemente, así es: no hay otra posibilidad.

¿A costa de qué, entonces, puede asegurarse el equilibrio dinámico? Por lo visto, al encontrarse en el seno del núcleo el electrón llega a participar en los procesos sobre cuyo fondo su inestabilidad deja de ser importante. ¿Cuáles son estos procesos?

2. ¿Cómo se realizan las interacciones nucleares?

Comparación a la cual retornaremos con frecuencia

Comencemos por un ejemplo característico al cual, en distintas variantes, se recurre con frecuencia para ilustrar la dinámica intranuclear.

Figúrense, por ejemplo, que dos personas llevan una carga, con la particularidad de que esta carga es de tal índole que para los dos hombres resulta imposible agarrarla simultáneamente, pero dicha carga, al mismo tiempo es tan pesada que uno es incapaz de sostenerla durante un lapso largo. Tampoco se puede bajar la carga a la tierra para descansar. Según la condición, si la carga cayó de las manos, ya no se permite levantarla.



Por supuesto, de no estar presente la segunda persona, el asunto habría terminado con que el primer hombre, tarde o temprano, hubiera dejado caer la carga. (Aquí, inmediatamente, viene a la memoria la comparación con el neutrón el cual, encontrándose solo, se desintegra.) Pero, al mismo tiempo, los hombres podrán llevar la carga, pasándola, en cuanto uno se siente cansado, de uno a otro.

¿No es que en el núcleo sucede algo semejante? Cuando uno piensa cuál es el motivo de que el neutrón libre, tomado separadamente, se desintegra inminentemente, mientras que en el núcleo este mismo neutrón se comporta como una partícula por completo estable, involuntariamente

se le ocurre la idea de que tan sólo la presencia del protón al lado del neutrón estabiliza a este último.

Finalmente, si se sigue con la analogía de nuestro ejemplo, ¿qué es aquello que puede hacer las veces de la "carga" que intercambian el protón y el neutrón?

Todo está en manos de la interacción

Aquí tenemos que detenernos para reflexionar a fondo: hablando con propiedad, ¿qué razón podemos aducir a favor de la analogía citada? ¿Por qué hemos de considerar, obligatoriamente, que el neutrón y el protón deben intercambiar algo? Y, finalmente, ¿cómo averiguar la naturaleza de este "algo"?

Ahora llegó el momento conveniente para recordar un "pequeño detalle": las partículas en el núcleo no sólo están presentes: éstas, de un modo estrechísimo, se encuentran "soldadas" entre sí. Es insuficiente "estabilizar" los neutrones, es preciso, además explicar la estabilidad de todo el núcleo. Y aquí resulta que estos dos problemas, íntimamente, están entrelazados.

De este modo, nos hemos acercado apretadamente al problema de las interacciones intranucleares.

Varias páginas antes, al examinar el cuadro de interacciones en la teoría cuántica, hemos descubierto, inesperadamente, que dicho cuadro hace recordar... el juego de balonvolea. Las partículas intercambian, lanzándolos, los cuantos del campo intermedio. Desde este punto de vista, también la interacción de los protones y neutrones en el interior del núcleo debe determinarse por el hecho de que éstos lanzan, intercambiándolas, ciertas partículas. Partículas que son transportadores de interacción.

Este cuadro físico es sumamente patente. Recordemos aunque sea nuestro ejemplo: dos hombres con una carga pesada. Para poder sostener esta carga tienen que todo el tiempo transferirla de uno a otro. Pero para realizar su cometido, indispensablemente, deben encontrarse uno al lado de otro. La necesidad (y la posibilidad) del intercambio los aproxima y une. Para un observador extraño todo se presentaría de modo como si actuasen las fuerzas de atracción.

Está claro que esta comparación, al igual que cualquier analogía, debe servir, principalmente, a un solo fin: crear una imagen palmaria.

Sin embargo, esta imagen, de por sí, puede servir de llave para la comprensión más profunda del quid del fenómeno.

Una vez más surge la cuestión sobre las "partículas-intermediarios" que cimientan el núcleo. Propiamente hablando, ¿qué son estas partículas? ¿Cuáles son sus propiedades?

La mecánica clásica y el núcleo

Aquí nos vemos obligados a repetir las palabras: sin la teoría cuántica es imposible formar la idea acerca de esta materia. En efecto, figurémonos por un momento que el núcleo vive sujeto a las de la física clásica.

Sea que nos detenemos en el núcleo más simple, el deuterón. Éste consta de un protón y un neutrón. He aquí que se encuentran uno al lado del otro "desviviéndose" por intercambiar partículas, cualesquiera que sean. Mas, lamentablemente, la mecánica clásica, de modo implacable, les prohíbe hacer tal cosa. Efectivamente, para que se inicie la interacción cada cual debe expulsar (emitir, como dicen los físicos) y absorber partículas.

Mientras tanto, las leyes de conservación de la

energía y el impulso, dentro de los marcos de la clásica, prohíben a la partícula libre cualquiera que sea emisión*:. (No se debe confundir la emisión efectuada por una partícula y su desintegración. Cuando el neutrón emite ciertas partículas —que designemos con la letra A— el proceso se desarrolla por el siguiente esquema:

neutrón → neutrón + A.

En otras palabras, el neutrón existe tanto antes, como después de la transformación).

Es especialmente nítida la situación con la masa. Es que en el caso de que un protón (o un neutrón) emitiría cierta partícula, ésta, evidentemente, llevaría consigo parte de la masa. Bueno, adelantándonos un poco y hallando en la tabla la masa de los transportadores de la interacción intranuclear, podemos sustraerla de la del protón para convencerse de que el resto no se ajusta a ninguna de las masas de las partículas insertadas en la tabla. ¡Una paradoja manifiesta! ¡Realmente, es imposible que el protón o el neutrón, despues de emitir una partícula intermedia, se transforme en algo que, en general, no existe!

Esta paradoja no es la única. Estrictamente hablando, todos los fenómenos en el seno del núcleo son absolutamente paradójicos, si se les aborda con el patrón de la teoría clásica. Nos hemos encontrado ya antes con semejantes paradojas.

Ahora tratemos de poner en claro la cuestión sobre las partículas-intermediarios enfocándola desde las posiciones de la descripción cuántica de los acontecimientos desarrollados.

---

* Así, por ejemplo, el electrón libre no puede emitir (y absorber) ondas electromagnéticas.

Deducciones sacadas de la ... incertidumbre

Se elimina inmediatamente la objeción referente a que la ley de conservación de la energía y el impulso prohíbe a los protones y neutrones intraatómicos emitir y absorber cualesquiera que sean partículas. Es que se ha señalado ya que ni la coordenada y el impulso, ni la energía y el tiempo de existencia de cualesquiera de las partículas constituyentes del núcleo pueden tener simultáneamente valores determinados. La dispersión, o bien, recurriendo al lenguaje más acostumbrado para los físicos, la indeterminación cuántica de estas magnitudes elimina de una vez nuestras dificultades.

Sin embargo, con ello no hemos agotado el tema. Queda la paradoja con las masas. Pero precisamente aquí nos convencemos, con sorpresa, de que la mecánica cuántica no sólo nos saca del apuro, sino que, incluso, encuentra en la propia dificultad un manantial de extraordinario valor para obtener nuevos datos sobre los cuantos transportadores de la interacción.

Sin embargo, vamos a avanzar consecutivamente, armándonos de cierta paciencia y ánimo, pues nos espera un cálculo, aunque simple, pero, de todos, un cálculo.

Hemos hablado sobre la dispersión de las energías de las partículas en el núcleo. Vamos a fijar nuestra atención, digamos, en un protón determinado, designando la dispersión de su energía con $\Delta\varepsilon$.

Es evidente que la energía del cuanto transportador de la interacción (designemos la misma con la letra E) debe "encajar" precisamente en los marcos de esta dispersión. Dicha circunstancia nos permite escribir la igualdad

$$\Delta\varepsilon = E.$$

Ahora tenemos que tomar en consideración el hecho ampliamente conocido, descubierto por Einstein: entre la masa y la energía existe una admirable relación universal. La formulación verbal de esta relación es como sigue: la energía es igual al producto de la masa por el cuadrado de la velocidad de la luz. En denotaciones literales tiene la siguiente forma:

$$E = mc^2.$$

Seguidamente es necesario hacer un paso más. ¿Cuál es el valor de la dispersión de la energía $\Delta\varepsilon$? Aquí nos ayudará la relación de indeterminación. Como ya sabemos, la indeterminación de la energía está ligada con el tiempo durante el cual se desarrolla el proceso mediante la relación

$$\Delta\varepsilon = \frac{h}{\Delta t}.$$

¿Qué tiempo es este Δt? A todas luces, puede igualarse simplemente al tiempo de "estancia en el camino" de la partícula que transfiere la interacción. Resulta que es precisamente el intervalo entre el momento de emisión y el de absorción del cuanto, o sea, aquello que con pleno derecho se puede denominar "tiempo de interacción".

Pero el tiempo de estancia en el camino es igual a la distancia recorrida l_0 dividida por la velocidad del movimiento.

Por el momento nos interesa tan sólo la evaluación cualitativa. Por razón podemos sencillamente admitir que l_0 coincide con las dimensiones del núcleo (es decir, consideramos que cada cuanto atraviesa el núcleo de cabo a cabo) y la velocidad es igual a la de la luz. En este caso se obtiene

$$\Delta t = \frac{l_0}{c}.$$

Tampoco cuesta trabajo hallar, basándose en las igualdades escritas, la masa de la "partícula-intermediario":

$$m = \frac{h}{l_0 c}.$$

Es admirable que todas las magnitudes por cuyo medio se expresa m se conocen ya hace mucho por el experimento. Al sustituir los valores de la constante de Planck h, de las dimensiones del núcleo (más exactamente, se debería decir: del "radio de interacción") l_0 y de la velocidad de la luz c, descubrimos que la masa m tiene que ser igual, aproximadamente, a doscientas o trescientas masas del electrón.

Que el lector nos perdone la pequeña porción de cálculos que decidimos insertar aquí. Este proceder se compensa en plena medida por la importancia de los resultados obtenidos.

Logramos averiguar detalles sumamente sustanciales de las interacciones nucleares. Enumeremos lo más importante:

1. La interacción es resultado del intercambio de partículas.

2. La distancia a que se manifiesta la interacción (o, como se lo denomina con frecuencia, radio de acción de las fuerzas) es tanto menor cuanto mayor es la masa de las partículas que transfieren la interacción:

$$l_0 = \frac{h}{mc}.$$

3. La interacción es específicamente cuántica (está presente la constante de Planck h).

El conocimiento con el mesón comienza por la teoría

Estas interesantísmas conclusiones se hicieron por primera vez por el científico japonés Yukawa. En aquella época la lista de las partículas elementales fue muy modesta: incluía el fotón (cuanto del campo electromagnético), el electrón junto con su "semejante especular" positrón, el neutrino, el protón y el neutrón. Y, hablando con propiedad, nada más. La admirable audacia científica de Yukawa se manifestó en que éste, después de analizar los hechos, declaró decididamente: debe existir una partícula distinta de todas las demás y con una masa unas doscientas veces mayor que la del electrón. Esta partícula, precisamente, condiciona las interacciones intranucleares.

El vaticinio se confirmó brillantemente. La partícula a la cual Yukawa dio el nombre de mesón —propiamente hablando, ni siquiera una, sino tres con las masas próximas, pero con diferentes cargas (positiva, negativa y neutra)— estas partículas pronto fueron descubiertas experimentalmente y sus propiedades correspondían, con absoluta exactitud, a aquellas que imponía la teoría. La teoría mesónica de las fuerzas nucleares explica muchos aspectos del fenómeno.

Acción próxima

Estas fuerzas actúan a distancias muy cortas. Hablando con propiedad, partimos, precisamente, de este hecho al buscar la masa del mesón, basándonos, en fin de cuentas, en los datos experimentales. Algo semejante tiene lugar si, digamos, después de romper en dos pedazos una barrita de tiza, tratamos de juntar ambas mitades apretándolas una contra otra. ¿Por qué no

logramos hacerlo? En el lugar de la fractura las moléculas se encuentran "un poquísimo" más alejadas unas de otras que en el pedazo entero. Y esto resulta suficiente para que la interacción prácticamente se "desconecte". En el núcleo dicho fenómeno se manifiesta con mucha mayor brusquedad.

Los físicos dicen que las fuerzas nucleares son de acción próxima. Se puede estar muy pegado al núcleo sin sentir su presencia, aunque dentro del núcleo las interacciones son enormes y lo estabilizan.

¿Cuán grandes son las fuerzas nucleares?

Acabamos de escribir: dentro del núcleo actúan fuerzas enormes; éste encierra una energía gigantesca. Hagamos, pues, el intento de compararlas con algo bien conocido. ¿Se puede acaso calificar de enorme la energía que se libera, por ejemplo, cuando el hombre estornuda? Claro que no, será su respuesta. De la misma forma, es muy pequeño el trabajo que se debe invertir para recoger del suelo una moneda de un kopek. Es que todos los días cada uno de nosotros realiza un trabajo inconmensurablemente mayor.

Es posible que, precisamente por esta razón, a muchos les parezca sorprendente que el trabajo en nuestros ejemplos supera miles de millones de veces la energía necesaria para arrancar una partícula al más estable núcleo. ¡Miles de millones de veces!

¡Un momento! ¿Por qué, entonces, se habla sobre enormes energías intranucleares? ¿Cuál es la razón de que se construyen gigantescas instalaciones aceleradoras que consumen más energía que una ciudad cualquiera, destinadas para desintegrar los núcleos, si hasta al estornudar realizamos un trabajo suficiente para romper

los enlaces en el interior de muchos, muchísimos núcleos?

¿El lector ya habrá comprendido en qué reside el asunto? No es la energía total la que importa, sino aquella que corresponde a un núcleo o, todavía mejor, a una partícula en el núcleo. Aunque al recoger del suelo una moneda le comunicamos una energía total miles de millones de veces superior a la de enlace en los núcleos, resulta que en cada partícula nuclear recae una dosis infinitamente pequeña: menor que una millonésima de una millonésima fracción de energía de enlace. Incluso en el caso de acelerar la moneda a velocidades cósmicas de decenas de miles de kilómetros por hora, indistintamente, la energía relacionada con este movimiento y que corresponde a una partícula seguirá siendo miles de millones de veces menor que la intranuclear. Es fácil imaginar, pues, cuán difícil es obtener un "proyectil" capaz de destruir el núcleo. Dicho proyectil debe poseer energía suficiente para romper este último.

En resumidas cuentas, al reflexionar sobre el problema de si las energías intranucleares son grandes y hacer el parangón, siempre tenemos que recordar que, sea como fuere, la energía correspondiente a una partícula sirve de la única medida.

Pongamos fin a la discusión de este problema haciendo una comparación más, esta vez, la última. Confrontemos las energías química e intranuclear. Esta confrontación arroja resultados sumamente imponentes: la energía de enlace específica (es decir, correspondiente a una partícula) en los núcleos sobrepasa la energía específica química un millón de veces, aproximadamente. ¿Acaso conviene sorprenderse, entonces,

de que por ningún procedimiento químico sea posible originar (como lo intentaban hacer los alquimistas) la transformación de unos elementos (es decir, en esencia, de los núcleos, por cuanto es la composición del núcleo, precisamente, la que determina la estructura del átomo y sus propiedades químicas) en otros.

Sí, las energías concentradas en los núcleos son, efectivamente, enormes. Las interacciones, de un modo vigorosísimo, cimientan las partículas intranucleares. Lo mismo puede exponerse también de otra forma: si (por analogía con la carga eléctrica) se introduce una carga nuclear (de ordinario, ésta se suele denominar no carga, sino constante de interacción) dicha carga resultará mucho mayor que la eléctrica.

Nuevos hechos, nuevas conclusiones

En nuestro relato acerca de la interpretación mesónica de las interacciones nucleares no trajimos a colación toda una serie de otras circunstancias importantes que completan esencialmente el cuadro dibujado. Después de que Yukawa predijo la nueva partícula: el mesón, los experimentadores enérgicamente emprendieron su búsqueda. Las búsquedas, de por sí, representan un capítulo interesantísimo de la ciencia. Es suficiente decir que tan sólo durante estas exploraciones habían sido descubiertas ni más ni menos que cinco partículas. Dos de éstas, cuya masa superaba 207 veces la del electrón y que poseían, una, la carga eléctrica positiva, y la otra, negativa, recibieron el nombre de mesones mu (se designan como μ^+ y μ^-). Durante cierto tiempo se consideró que éstas son, precisamente, los mesones de Yukawa. Sin embargo, los mesones μ no manifestaban actividad alguna en la interac-

ción con los núcleos. En este respecto no se diferenciaban de los electrones.

Nuevas búsquedas dieron lugar al descubrimiento de mesones pi (mesones π que, a veces, se denominan también piones) los cuales, por todos los indicios, eran idóneos para protagonizar el papel de los transportadores de la interacción nuclear. Los mesones π resultaron ser de tres tipos: con carga eléctrica positiva (π^+), con carga eléctrica negativa (π^-) y, por fin, neutros (π^0). Sus masas son hasta tal punto próximas (273,1 de masa electrónica para los dos primeros y 264,1 para los últimos) que estas partículas, con plena razón, se consideran no mesones diferentes, sino un mismo mesón "en distintos estados de carga"

Las investigaciones ulteriores aumentaron considerablemente el número de partículas que conocíamos y que transferían, al igual que los mesones π, la interacción. Estas nuevas partículas son más pesadas que los mesones π, unas, cuatro veces, aproximadamente, otras, seis veces e, incluso, más. Como nos damos cuenta ahora, por eso disminuye correspondientemente el radio de acción de las fuerzas debidas al intercambio de estas partículas. Además, el cuadro de interacciones se torna más complicado porque todos los mesones se emiten muy frecuentemente, de modo que tanto el protón, como el neutrón están rodeados por una densa nube de estas partículas (más correctamente sería decir que las nubes en cuestión son parte constituyente de las partículas). No es de extrañar, pues, que todavía falta un cuadro cuantitativo completo de las interacciones.

Sin embargo, se han advertido ya muchas regularidades importantes. En particular, pertenecen a éstas la independencia de carga de las interacciones nucleares, es decir, el carácter idéntico

tanto de las interacciones protón-protón, como de las protón-neutrón y neutrón-neutrón. La independencia de carga puede considerarse como la manifestación del hecho de que durante la transferencia de la interacción se revelan simétricamente tanto las partículas positivas y negativas, como las neutras.

Anteriormente, sólo hablamos sobre la atracción entre las partículas en el núcleo que disminuía con rapidez al aumentar la distancia entre las mismas. Pero, por lo visto, también al disminuir la distancia, esta atracción, después de pasar por el máximo, debe decrecer transformándose luego en repulsión. Este efecto se explica cualitativamente en la teoría mesónica si se tiene en cuenta el intercambio simultáneo de varios mesones. El teórico soviético N. N. Kolésnikov hizo interesantes e inesperadas deducciones referentes al potencial de las interacciones de nucleones. Fundamentándose en amplio material experimental, el científico llegó a la conclusión de que, por lo menos, para la interacción entre los nucleones y las llamadas partículas Λ^0 (es uno de los "hiperones" de los cuales hablaremos más tarde) en muchos aspectos muy parecidos a los nucleones, la atracción, a medida que disminuye la distancia, se transforma en repulsión, después, de nuevo llega la atracción, y luego, a distancias muy pequeñas, una vez más tenemos que vernos con la repulsión ya más considerable. El análisis detallado de la interacción de nucleones todavía no está consumado aunque ya ahora queda claro que aquí es importante el intercambio multimesónico.

Una observación triste

"Con qué sencillez se resuelve la multitud de problemas de la física del núcleo si se atrae la idea sobre la naturaleza mesónica de la interac-

ción" —así puede pensar el lector—. "Tanto la acción próxima, como la independencia de carga, la estabilidad y otras muchas cosas encuentran una explicación evidente".

Evidente: sí. Precisamente en aras de la evidencia aducimos el cuadro mesónico de las interacciones entre nucleones. En cuanto a la explicación... Es que dar la explicación —y, además, una explicación cuantitativa— significa construir una teoría, mientras tanto por ahora no sucedió precisamente esta transformación del "cuadro" en teoría. Esta circunstancia no quiere decir, desde luego, que, en general, no sabemos describir cuantitativamente los núcleos; se trata tan sólo concretamente de la teoría mesónica de las interacciones nucleares. Muchas cuestiones pueden resolverse sin introducir "modelo" alguno; así, por ejemplo, la existencia de núcleos estables se explica de modo natural por el hecho de que su desintegración está prohibida, meramente, por consideraciones energéticas. Se utiliza ampliamente la información acerca de la interacción de los nucleones obtenida de los experimentos para la dispersión de estas partículas. Averiguamos cada vez más sobre la forma de los núcleos, sobre los procesos que en éstos se operan, así como sobre los métodos de descripción teórica de estos procesos. Sin embargo, todos estos métodos, en cuanto a su carácter patente, son muy inferiores a nuestro "cuadro", circunstancia que, precisamente, nos obliga a volver a éste una vez más, a pesar de comprender lo justo de los reproches que nos pueden dirigir los conocedores rigurosos.

Carga bariónica

Al estudiar los procesos en el núcleo no se puede soslayar, silenciándola, una importantísima ley de la naturaleza: los protones, los neutrones y todas las partículas más pesadas que éstas (unidas por el nombre común de bariones) no se engendran, no se destruyen y no se transforman, por separado, en mesones o en partículas más ligeras. Nacer y aniquilarse sólo pueden pares: barión—antibarión. La misma cosa puede expresarse más brevemente: *la diferencia del número de bariones y antibariones en cualquier sistema queda invariable.*

Es conveniente introducir un número cuántico especial: la carga bariónica. Para cada barión ésta toma el valor de +1, y para el antibarión, el de —1. La ley de conservación de la suma algebraica de estas cargas es uno de los enunciados fundamentales de la teoría: la diferencia entre el número de bariones y antibariones queda invariable, cualesquiera que sean las partículas que se engendran y se aniguilan en el proceso de interacción. Y aunque ahora algunos teóricos ponen en duda el carácter absoluto de la prohibición de la variación de la carga bariónica, está claro que la probabilidad de su variación es infinitamente pequeña.

3. Transmutaciones de los núcleos atómicos

Desintegración β

Cabe recordar que el neutrón es inestable. ¿Cómo, entonces, éste puede ser parte constituyente de los núcleos estables?

La cuestión radica en que es el neutrón libre el que resulta ser inestable. Por cuanto es más

pesado que el protón (pues, la masa es proporcional a la energía: acuérdese de la célebre fórmula de Einstein $E=mc^2$) desde el punto de vista energético es ventajoso al neutrón libre transformarse en protón. Ahora bien, cuando el neutrón y el protón se encuentran en el núcleo



surge, además, la energía de interacción. La energía de atracción nuclear (análogamente a cualquier atracción) es negativa. Mientras tanto, la energía de repulsión eléctrica de los protones es positiva. La transformación del neutrón que está en el núcleo en un protón no libera energía, sino requiere su consumo. Por esta causa el número de neutrones, por lo menos en los núcleos no demasiado pesados, queda invariable.

De acuerdo con la expresión de Ford "el neutrón saca su estabilidad en la energía de enlace con el protón. Se trata de un balance muy fino". Y seguidamente: "Parece casi un milagro que la naturaleza, en vez de uno, recibió a su disposición 90 diferentes ladrillos para el Universo" (el autor se refiere al número aproximado de núcleos estables).

¿Pero es que siempre se puede asegurar la estabilidad de los neutrones en el núcleo? Resulta que no, no siempre. No olvide que el neutrón es más pesado que el protón tan sólo en 1/1000 de su masa. Debido a ello, si la parte de los neutrones llega a ser demasiado grande, ni siquiera la interacción salvadora podrá impedir que éstos se desintegren. Al neutrón "sobrante" resulta más ventajoso energéticamente transformarse en protón (después de lo cual la proporción de partículas en el núcleo se hace más estable). Durante este proceso se engendran y salen volando del núcleo el electrón y otras partículas de las cuales hablaremos más detalladamente en el siguiente capítulo. En ello, precisamente, consiste la desintegración β.

También es posible la situación inversa: el núcleo contiene un "exceso" de protones. Por cuanto debido a la interacción en el núcleo la diferencia en las masas de los protones y neutrones deja de jugar un papel decisivo, estas partículas adquieren aquí una considerable igualdad de derechos. Esta igualdad se manifiesta, en particular, en que el protón, en las correspondientes condiciones, puede convertirse en inestable y desintegrarse a semejanza del neutrón.

Está claro que existe una diferencia: el neutrón al desintegrarse emite una partícula negativa, el electrón. En cambio, el protón irradia una partícula positiva, el positrón. Durante la desintegración β positrónica un protón (el "excesivo") se transforma en neutrón, lo que asegura el restablecimiento de la norma estable de partículas en el núcleo.

Desintegración α

Examinaremos ahora la desintegración α. Este fenómeno descubierto (al igual que la desintegración β) a finales del siglo pasado por Becquerel pronto devino objeto de un atento estudio experimental. Aquí, en primer término, deben destacarse los trabajos de María y Pierre Curie, así como de Rutherford y de muchos otros científicos. He aquí lo que descubrieron. Durante la desintegración α del núcleo sale volando una partícula que lleva carga positiva igual a dos (en unidades electrónicas) y cuya masa, casi exactamente, es cuatro veces mayor que la del protón. Según todos los indicios, la partícula α es meramente de núcleo de helio, es decir, una pareja de protones y una de neutrones cohesionados en un todo único.

¿Cuál es la causa de que tiene lugar la desintegración α? ¿Por qué es inherente sólo a los núcleos pesados? ¿Por qué razón unos núcleos se desintegran con gran rapidez, mientras que otros, antes de expulsar la partícula α, viven durante miles de millones de años? Éstas son las primeras preguntas que requieren que se reflexione sobre ellas.

En primer lugar cabe señalar la diferencia, que salta a la vista entre las desintegraciones β y α. Si bien durante la primera del núcleo salen partículas que antes no existían en éste y las cuales, por consiguiente, debían engendrarse, nacer en el propio proceso, resulta que durante la emisión el núcleo expulsa explícitamente cierta parte integrante suya.

La cuestión es si la partícula α existe, por decirlo así, en forma hecha, como un todo único dentro del núcleo, o si dos protones y dos neutrones se "aglutinan" directamente, antes de su salida. El punto de vista más difundido es que

la segunda variante es la más probable (aunque, a veces, se expresa la opinión opuesta). Sea como fuere, uno es indudable: la partícula α es un sistema extraordinariamente compacto, estable y cimentado sólidamente que se engendra (ya sea que de inmediato antes de la emisión, o bien con anterioridad) en el seno del núcleo.

¿Pero cuáles son las fuerzas que expulsan la partícula α ? Por supuesto, dicha partícula lleva la carga eléctrica, con la particularidad de que esta carga es del mismo signo que todo el núcleo y, por consiguiente, entre el núcleo y la partícula α debe existir una repulsión. Sin embargo, en el interior del núcleo ésta es superada, de modo considerable, por la potente atracción nuclear. De no existir este fenómeno, como ya lo hemos señalado, todos los núcleos deberían desgajarse en sus partes integrantes.

Salto por encima de una pared

Sin embargo, si las fuerzas de atracción son mayores que las de repulsión, ¿de qué modo, en general, puede tener lugar la desintegración? Aquí otra vez nos enfrentamos con el efecto cuántico específico. ¿Puede una patata que se encuentra en una cacerola saltar de ésta por sí sola? Claro que no, ya que la energía que posee esta patata es insuficiente para darle la posibilidad de subir hasta los bordes de la cacerola. Tampoco puede escaparse de nuestras manos —abriendo los dedos— el lapicero, pues le impide hacerlo el esfuerzo que lo retiene. Mas tanto la patata, como el lapicero son objetos clásicos, grandes o, repitiendo el término que el lector ya conoce, objetos macroscópicos que constan de un número enorme de partículas. Mientras tanto la partícula α sólo contiene dos protones y dos neutro-

nes. Esto significa que aquí deben influir fuertemente la dualidad onda—corpúsculo y la relación de indeterminación que se desprende de ésta. La partícula α, en cierto sentido, también se encuentra en un recipiente. Este recipiente es el núcleo. Por consiguiente, debe existir la indeterminación del impulso y la dispersión de las energías. Al retornar una vez más al ejemplo con la patata, podemos figurarnos, aproximadamente, el siguiente cuadro: parece como si la patata experimentase constantemente sacudidas, empujes, en una palabra, ciertos movimientos. En este caso, existe la plena posibilidad de que en un momento determinado la energía cinética se acreciente hasta tal punto que se haga posible el salto por encima de la pared.

Se sobreentiende que todo lo expuesto no se puede extender literalmente al núcleo. Éste no está cercado por ningún muro o valla. Aquí, a costa de la dispersión de las energías, se ofrece la posibilidad de fugarse del cautiverio de las atracciones nucleares para salir fuera de los límites del núcleo. Apenas hubo ocurrido semejante cosa, apenas la partícula α "hubo traspasado el umbral del núcleo", las fuerzas de atracción disminuyen bruscamente por cuanto son de acción próxima. Ahora llegan a ser dominantes las fuerzas eléctricas de repulsión cuyo decrecimiento es mucho más lento. Éstas, literalmente, expulsan con violencia las partículas α del núcleo, acelerándolas hasta energías muy grandes. He aquí la razón de que dichas partículas vuelan a velocidades tan colosales.

¿Qué se ha pasado por alto?

En nuestros razonamientos hay un lugar confuso. ¿Por qué del núcleo sale la partícula α y

no, digamos, un protón?* Es que todas las consideraciones acerca de la indeterminación del impulso y la dispersión de la energía son aplicables también a este caso. Evidentemente, en nuestros razonamientos perdimos de vista algo muy esencial. Intentemos comprender qué es, precisamente, lo que soslayamos.

Tanto en un caso, como en otro la dispersión de la energía, contando por una partícula, es la misma. ¿Se trata, tal vez, de las fuerzas de repulsión? Por cuanto las partículas α incluyen dos neutrones, es decir, una mitad del sistema no tiene carga, la repulsión en su expresión "puramente protónica" es, incluso, dos veces mayor. Y si, a pesar de todo, no son los protones los que se expulsan, sino los núcleos de helio, es evidente que el motivo puede ser sólo uno: los enlaces que retienen en el núcleo una partícula: el protón, son más fuertes que aquellos que retienen la partícula.

Saturación de las fuerzas nucleares

Analicemos un modelo sencillo que nos ayudará a poner en claro el quid de la cuestión. Figúrense un juego de bolas, y de cada una de éstas parten cuatro hilos. Hay que atarlas juntas, tratando de utilizar todos los hilos. He aquí uno de los métodos para atar las bolas (I). Es, por decirlo así, el ejemplo de enlaces uniformes, todas las bolas se encuentran en condiciones iguales. No es difícil comprender que arrancar de la cadena obtenida un grupo cualquiera de bolas no es más fácil(es decir, es necesario romper un número no menor de hilos) que hacerlo con una sola bola.

* No hace mucho los físicos soviéticos descubrieron también la desintegración protónica de los núcleos. Sin embargo, éste es un fenómeno extraordinariamente raro.

Pero he aquí otro esquema de conexiones (II). Ahora el cuadro cambió de modo sustancial: para arrancar una bola (involuntariamente, se quiere decir, una partítula) es necesario, como antes, romper cuatro hilos. Sin embargo, al mismo tiempo apareció un grupo ligado al resto del sistema solamente por dos hilos. Fíjense en que este grupo, de por sí, es muy estable: en él apareció un "enlace complementario", o sea, un hilito interior más.

Precisamente esta acentuación de los enlaces internos debilita las conexiones externas del grupo con las demás bolas del sistema.

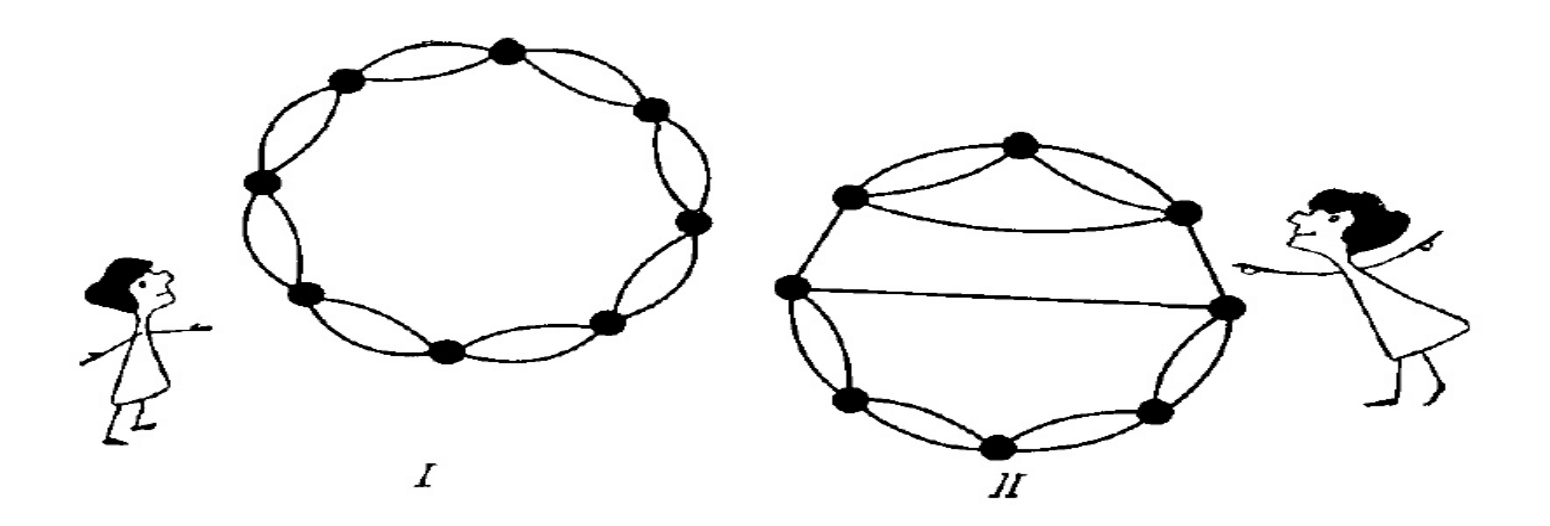
Finalmente, es posible dibujar dos esquemas más que reflejan esta circunstancia con extrema nitidez: aquí, el reforzamiento de las conexiones internas da lugar a la completa separación de los grupos. Todos los hilitos se utilizaron para los enlaces internos de modo que para los "enlaces externos" no quedó nada.

Está a la vista la siguiente tesis: cuanto más fuertes son los enlaces dentro de un grupo determinado de bolas, tanto menor es el número de hilos que las liga con las demás y tanto más fácil es, en consecuencia, arrancar este grupo del sistema.

Por supuesto, no ocurrirá nada semejante, si se hubiera podido atar a nuestra bola una cantidad como se quiera grande de hilos. Por consiguiente, el asunto radica en que cada bolita es capaz de atarse a un *número limitado* de sus vecinos.

Esta última circunstancia es en sumo grado esencial y merece ser recalcada. Pues si algo semejante se revela en los núcleos resulta que hemos rastreado una particularidad interesantísima de las fuerzas nucleares.

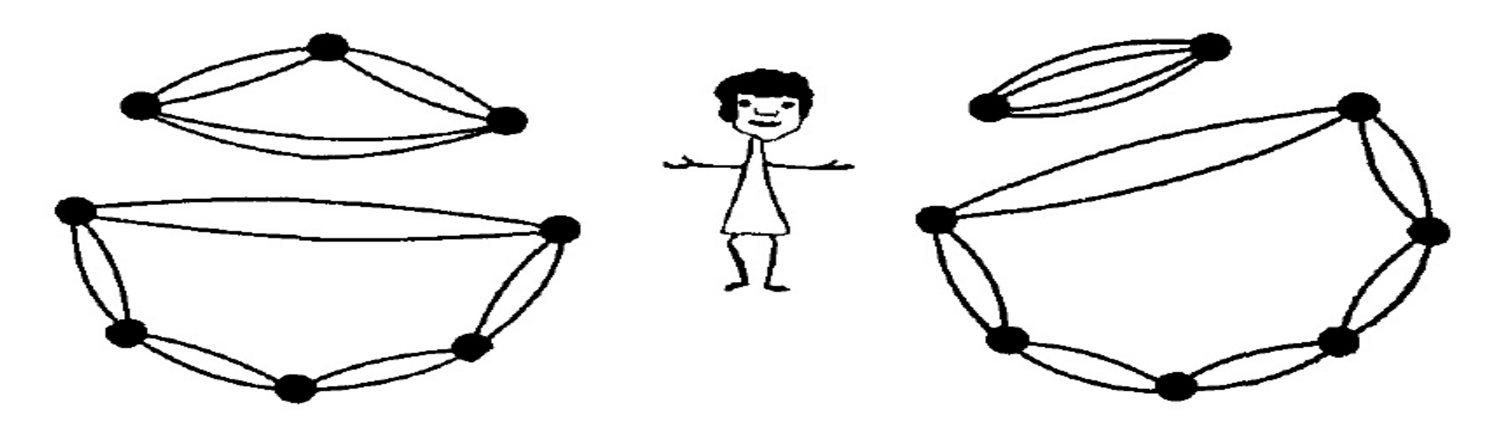
Pero, ¿acaso buscamos analogías donde éstas *no se presentan*? Sin embargo, numerosos hechos



nos convencen de que esta analogía puede establecerse y, además, ésta será la analogía más cercana.

En primer término, la partícula α es, sin duda alguna, una partícula muy densamente aglutinada. No en vano esta misma se aplica con frecuencia como cierto proyectil monolítico para bombardear otros núcleos. ¿Y no puede este carácter monolítico servir de causa, precisamente, de la atracción relativamente débil por parte de otras partículas intranucleares?

¿Quizá sea posible, al igual que en el modelo con las bolas, figurar que cada protón o neutrón entra en interacción activa tan sólo con una cantidad relativamente pequeña de partículas que lo rodean? ¿Hay fundamento para tal suposición? ¡Sí! Hablando con propiedad, ya hemos llegado a esta conclusión anteriormente, cuando discutíamos la desintegración β. Recuerden, allí se decía con qué sutileza se debía equilibrar la relación entre el número de protones y el de neutrones en el núcleo para que ésta resultase ser estable. En un núcleo estable a cada protón corresponden, aproximadamente, uno o dos neutrones (en los núcleos ligeros, menos; en los pesados, más). El "juego" de las



atracciones nucleares de las repulsiones electrostáticas entre los nucleones —con esta denominación común se unifican las partículas de las cuales están construidos los núcleos— condiciona *cierta distribución completamente determinada* de dichos nucleones en el núcleo, para la cual cada uno de los mismos experimenta la influencia tan sólo de sus vecinos más próximos. ¿Por qué de los más próximos? Simplemente porque, como ya sabemos, las fuerzas nucleares se "dejan sentir" sólo a distancias muy pequeñas. Los físicos suelen dar a este fenómeno el nombre de saturación de las fuerzas nucleares.

Otro hecho interesante también testimonia sobre la existencia de la saturación; es el hecho conocido como la ley de la constancia aproximada de la densidad nuclear. Los experimentadores establecieron que el tamaño de los núcleos incrementa como la raíz cúbica del número total de partículas que los mismos encierran. En otras palabaras, el volumen (proporcional al cubo del radio) aumenta directamente proporcional a este número. Por consiguiente, el volumen correspondiente a cada partícula en todos los núcleos queda, prácticamente, el mismo. Procuremos explicar este hecho. Figúrense que se unen dos núcleos: más tarde tendremos que hablar más detalladamente sobre

esta "fusión". Si todas las partículas entrasen en interacción con todas las otras, durante su unión debería tener lugar un "encogimiento". A costa de la atracción aumentada las partículas resultarían comprimidas más densamente que antes. Sín embargo, no ocurre nada semejante: el volumen asignado a cada partícula no dismunuye. Esto significa que la mayoría de las partículas (prácticamente todas, a excepción de aquellas que se encuentran en el lugar de unión) no sentirá ningún cambio en las interacciones. Esta circunstancia se explica, precisamente, porque para las fuerzas que actúan sobre las mismas ya llegó la saturación, y la aparición en las cercanías de unas partículas nuevas no añade nada a estas fuerzas.

Ahora, cuando trabamos conociemento con el fenómeno de la saturación y cuando se pone de manifiesto el carácter fundamentado de la analogía con el modelo que acabamos de examinar, se nos abre el camino a la comprensión de las particularidades más esenciales de la desintegración α.

Por ejemplo, es bien sabido que se someten con "mayor deseo" a la desintegración α núcleos relativamente más pesados constituidos por muchas partículas. A todas luces, el asunto radica en que para el número pequeño de partículas, la saturación todavía no se manifiesta en su plena medida.

Ahora, para nosotros ya no es difícil contestar a la pregunta con la cual empezamos: ¿por qué, con mayor frecuencia, de los núcleos sale volando un grupo integrado por cuatro partículas —dos protones y dos neutrones— y no partículas individuales? Ya nos hemos convencido de que debido a la aglutinación de los protones y neutrones en una partícula α se debilitan sus enlaces con el resto de su entorno. Y apenas

semejante cosa haya ocurrido, la dispersión de la energía condicionada por el principio de indeterminación resultará completamente suficiente para que tenga lugar la desintegración α.

Así, pues, hemos formado la idea acerca de dos tipos de inestabilidad nuclear. Sólo nos queda añadir varias palabras acerca del tercer tipo, que es la fisión de los núcleos.

Fisión de los núcleos

Como se advierte por el propio título, la fisión no es la emisión por el núcleo de cierto grupo pequeño de partículas, cuestión que se trataba en los casos anteriores, sino el "desmoronamiento" del núcleo casi en partes iguales. Sólo pueden fisionarse núcleos muy pesados, en cuya composición entran más de 250 partículas. Este hecho, de por sí, da la clave para comprender el proceso. Ya estamos enterados de que las fuerzas nucleares se dejan sentir solamente a distancias muy cortas y sabemos sobre la saturación, por lo tanto no nos es difícil figurar qué se desarrollará en los núcleos con tan enorme cantidad de partículas. En este caso, las diferentes partes del núcleo deben vivir casi en absoluta autonomía. Las partículas dispuestas en los extremos opuestos, en la práctica, apenas si están ligadas. Basta con "sacudir" un poco un núcleo de esta índole para que se descomponga en dos mitades. Así, por el menor empuje y hasta por la acción de su propio peso se desmorona un pedazo de arcilla, y del mismo modo, se parte en dos mitades, incluso por una leve sacudida, una gota grande de azogue. (Preste atención a que gotas pequeñas y pedazos pequeños de arcilla son mucho más resistentes). Esta circunstancia, por lo menos desde el punto de vista cualitativo, parece tan sencilla y evidente que podríamos terminar

nuestro relato sobre la fisión, si no fuese por una circunstancia muy esencial.

Si echamos una mirada a la tabla de los núcleos (y, en la práctica, puede servir de tal la tabla de Mendeléiev) nos cercioraremos inmediatamente de que la masa de los núcleos crece del elemento al elemento con mayor rapidez que la carga. En otras palabras, la cantidad de protones en los núcleos incrementa a paso más lento que el número de neutrones.

No cuesta ningún trabajo comprender la causa de ello. Las fuerzas eléctricas de repulsión no se saturan. Cada protón entra en interacción con todos los demás cualesquiera que sea su número (aquí influye también el hecho de que las fuerzas culombianas se sienten asimismo a grandes distancias). A medida que aumenta el número de protones las fuerzas de repulsión llegan a ser cada vez más considerables. Y se pueden compensar solamente a costa de la aparición en el núcleo de una cantidad cada vez mayor de neutrones insensibles a la repulsión eléctrica, pero los cuales, al mismo tiempo, hacen su aporte a la atracción nuclear. Para conseguir que esta atracción esté en condiciones de crecer con mayor rapidez que la repulsión eléctrica, la capa intercalada de neutrones, debe hacerse cada vez más considerables del núcleo al núcleo. Es que cada protón (¡saturación de las fuerzas nucleares!) se atrae no por todas partículas, ni mucho menos, sino solamente por las más próximas a él. Por esta razón es natural que, a medida que aumenta el número de partículas en el núcleo, deba incrementar incesantemente la proporción de neutrones.

Ahora figúrense que tuvo lugar la fisión de cierto núcleo pesado. Por ejemplo, del núcleo del isótopo de uranio-239 con 92 protones y 147 neutrones. Para mayor sencillez vamos a considerar que este núcleo se desintegró aproxima-

damente en dos mitades iguales. En este caso, cada fragmento debe contener 46 protones y 73 ó 74 neutrones. La cantidad de protones y, por consiguiente, también la carga del núcleo (en unidades electrónicas) coincide con el número del elemento en el sistema periódico de Mendeléiev. En consecuencia, los fragmentos son núcleos de paladio. Pero el isótopo más estable de paladio contiene en el núcleo 61 neutrones. ¿A dónde irán a parar, entonces, los 12 ó 13 neutrones superfluos que corresponden a cada uno de los fragmentos? Por supuesto, éstos, a costa de la desintegración β, pueden transformarse en protones. Sin embargo, por cuanto la fisión se desarrolla muy rápidamente, se da tiempo para que transcurra algo todavía más simple (desde luego, simple sólo por apariencia). Parte de los neutrones sobrantes meramente se expulsa, convirtiéndose en libre. Precisamente esta liberación de neutrones permite existir al fenómeno conocido bajo el nombre de reacción en cadena.

En efecto, si se reúne una cantidad determinada de núcleos fisibles, entonces, tarde o temprano, por acción de ciertos factores externos y, a veces, también espontáneamente, uno de estos núcleos se desintegra en fragmentos. Los neutrones que se desprenden en este caso irrumpen sin impedimentos (pues no experimentan repulsión eléctrica) en los núcleos vecinos, produciendo en éstos una sacudida, aunque insignificante, pero suficiente como para que los mismos, a su vez, se fisionen. Nuevas fisiones dan lugar al flujo de nuevos neutrones, y el proceso crece en avalancha, envolviendo con gran rapidez, como el fuego que consume la paja, todos los núcleos fisibles*).

* Se sobreentiende que hemos esquematizado algo la reacción de fisión en cadena. En la realidad, no todos los neutrones se capturan por los núcleos fisibles, y los capturados no siempre provocan la fisión.

Y por cuanto en cada fisión los fragmentos adquieren enormes energías, —la repulsión eléctrica, con fuerza colosal, los hace separarse unos de otros,— en la sustancia físil, muy rápidamente, se libera gran cantidad de energía llevada por las irradiaciones electromagnéticas y otras, así como gran cantidad de calor que puede utilizarse. Millones de personas en la Tierra luchan para aprovecharlo en bien de los habitantes de nuestro planeta.

Reviste interés que los núcleos muy pesados, como lo establecieron en 1940 K.L. Petrzhak y G. N. Fliorov, pueden fisionarse espontáneamente.

Nos desviaríamos demasiado de nuestra tarea principal, si comenzáramos a contar detalladamente, por ejemplo, sobre las instalaciones industriales en las cuales se utiliza la energía liberada durante la fisión de los núcleos, sobre los reactores nucleares y sobre la energética nuclear en general. Pero en vista de que iniciamos la conversación acerca de las fuentes nucleares de energía, no se puede dejar de hablar de las llamadas reacciones termonucleares.

Cuando los núcleos se fusionan

El hombre, desde los tiempos inmemoriales, utiliza la energía que se desprende en las reacciones de fusión, de unión. Desde la época en que aprendió a servirse del fuego. Mas ésta es la "fusión" química: combinación de los átomos de oxígeno con los átomos y moléculas del combustible. ¿Por qué en este caso se desprende energía? ¿Por qué, por ejemplo, arde con una llama tan violenta (y, a veces, incluso explota) la mezcla de hidrógeno y oxígeno? Simplemente porque los átomos de oxígeno e hidrógeno tomados por separado poseen mayor energía que las moléculas

de agua las cuales se forman por combinación de dichos átomos. Precisamente esta diferencia de energía se desprende, se libera, durante la combustión.

Bien se puede cerciorar de la posibilidad de la "combustión nuclear" análoga. Con este fin sólo hace falta analizar en qué condiciones puede tener lugar la fusión de los núcleos.

A primera vista, el proceder más simple, es conseguir que se fusionen los neutrones. Es que entre éstos actúan solamente las fuerzas de atracción. Pero es imposible almacenar los neutrones. Los mismos penetran a través de cualesquiera paredes (o se absorben en su espesor) y, además, no se debe olvidar sobre su inestabilidad. Igualmente, no creemos que valga la pena discutir la fusión de dos protones. Aquí, un papel demasiado importante pertenece a la repulsión eléctrica. En cambio, los núcleos de deuterio (hidrógeno pesado), o sea, los deuterones, se encuentran en una posición completamente distinta. Éstos son estables. Es un sistema estable de un protón y un neutrón. Pero todavía más estable es el núcleo de helio que debe formarse por fusión de dos deuterones. No en vano durante la desintegración radiactiva salen volando precisamente partículas α, y no deuterones.

El lector realizará con facilidad las evaluaciones necesarias, siempre que tenga al alcance de la mano tablas bastante precisas de las masas de distintos núcleos. Hallamos en estas tablas la masa del deuterón $m_D = 2{,}0141$ (en unidades atómicas). Durante la fusión debe formarse helio. La masa del núcleo de helio $m_{He} = 4{,}0026$ ha de compararse con la masa de dos deuterones. Por cuanto m_{He} es menor que $2m_D$, el proceso que nos interesa es ventajoso desde el punto de vista energético, es decir, dos deuterones, al chocar, efectivamente pueden fusionarse. En este caso

debe liberarse energía (y vale la pena añadir, una energía bastante grande) a semejanza de como se desprende durante cualquier fusión química.

¿Y la repulsión eléctrica? —preguntará el lector. Está claro que ésta existe. Más aún, debido a esta repulsión cuesta mucho trabajo hacer acercarse dos deuterones. Pero, si a pesar de todo se logra superar las fuerzas eléctricas (y éstas comienzan a ejercer su influencia ya a grandes distancias) y poner los deuterones en una posición tan cercana que entran en juego las atracciones nucleares de acción próxima, resultará que las últimas inhiben por completo la repulsión.

De este modo, lo importante es hacer aproximarse los deuterones, y si esta finalidad se consigue, el trabajo gastado se pagará con creces, literalmente. ¿Pero cómo realizarlo, cómo hacer que los deuterones se acerquen?

Uno de los métodos consiste en calentar el hidrógeno pesado a temperaturas de decenas de millones de grados. A estas temperaturas la energía del movimiento térmico llega a ser suficiente para superar el blindaje de las fuerzas eléctricas. Durante las colisiones los núcleos se aproximan hasta tal grado que las interacciones mesónicas tienen tiempo para "aherrojarlos". Se desarrolla la reacción termonuclear, o sea, la fusión a costa de las temperaturas superaltas. Y, como se ha señalado ya, en este caso se desprenden energías colosales, debido a lo cual las tempearturas aumentan todavía más. El proceso de combustión nuclear se convierte en automantenido, mientras no se agote el combustible.

Los procesos termonucleares en la naturaleza no representan, ni mucho menos, algo raro y excepcional. La combustión de todas las estrellas, en particular, de nuestro Sol, se debe a la fusión nuclear. La verdad es que aquí el cuadro es

algo más complicado. No se reduce a la mera formación de helio a partir de deuterones. En la reacción se ve involucrada toda una cadena de núcleos, sin embargo, por esta circunstancia no se altera el aspecto de principio del asunto.

Sólo nos queda añadir a lo expuesto varias palabras más. ¿La fusión de qué núcleos es posible? Por supuesto, fundamentalmente, de los ligeros, pues cuantos más protones contiene el núcleo, tanto más difícil es superar la repulsión eléctrica. Sin embargo, existe, además, otra circunstacia más importante. En los núcleos demasiado pesados comienza a manifestarse el fenómeno de saturación de las fuerzas nucleares y en este caso la fusión es imposible. Téngase en cuenta que aquí el papel desempeñado por la saturación de las fuerzas nucleares recuerda en gran medida el de la saturación de las fuerzas químicas durante la formación de las moléculas, circunstancia a que nos referimos en su tiempo. De este modo, la elección del combustible no es objeto de grandes vacilaciones.

Todavía no sabemos realizar la reacción termonuclear controlada. Sobre este problema trabajan tenazmente las más grandes instituciones científicas. Subyugar la reacción termonuclear significa, en la práctica, resolver para siempre el problema bastante actual de los recursos energéticos de la humanidad.

¿Qué hemos conocido nosotros?

Ahora, quizá, sea lícito concluir el relato sobre las fuerzas nucleares. Averiguamos muchas cosas interesantes e importantes. En primer término, no se puede hablar, en el sentido literal de la palabra, acerca de las fuerzas en el núcleo. Es que la fuerza es una magnitud puramente clásica, no cuántica, igual al producto de la masa

por la aceleración. La dualidad onda-corpúsculo implica la imposibilidad de prefijar con exactitud la coordenada y la velocidad y, por consiguiente, también de la aceleración. En consecuencia, cuando se trata del micromundo no se puede hablar de ningunas fuerzas en el sentido mecánico de la palabra. En el micromundo se tiene que ver con otros criterios de interacción. El más simple entre éstos es la energía media de enlace. Acuérdense de la relación de indeterminación para la energía y el tiempo. Los núcleos estables existen, prácticamente, tan largo plazo como se quiera. Por lo tanto, para éstos la indeterminación del tiempo puede considerarse infinitamente grande. Pero, siendo así, debe ser infinitamente pequeña la indeterminación de la energía (fíjense: ¡para todo el núcleo, y no para las partículas que lo componen!). Pues, estas indeterminaciones son inversamente proporcionales una a otra. Precisamente la ausencia de dispersión de la energía permite conservar la misma, en su aspecto de característica de la interacción también para un objeto puramente cuántico como es el núcleo.

Hemos demostrado que la interacción se origina como resultado de intercambio de partículas intermedias. Al evaluar la masa de las últimas, llegamos al cuadro mesónico de la interacción.

No todo, ni mucho menos, es comprensible en este cuadro, aunque comienzan a esclarecerse ya algunos detalles cualitativos de la interacción nuclear.

Dicha interacción explica lógicamente la llamada independencia de carga (es decir, la independencia de las fuerzas nucleares que actúan sobre la partícula del hecho de que la partícula lleve o no la carga eléctrica): aquí el asunto reside simplemente en que también los transporta-

dores de la interacción pueden poseer cargas tanto positivas, como negativas (la carga, asimismo, puede faltar, en general).

Pero logramos avanzar aún más: explicar los rasgos principales de las desintegraciones β y α, así como formar la idea acerca de las reacciones de fisión y de fusión de los núcleos. Nuestras posibilidades todavía no están agotadas.

Por ejemplo, apoyándonos en los resultados obtenidos, estamos en condiciones de señalar inmediatamente que los mesones π no son monopolistas en la transferencia de la interacción nuclear (aunque en este aspecto les pertenece un papel notorio). Cualesquiera cuantos capaces de emitirse o absorberse por las partículas nucleares pueden transferir la interacción. Y cuanto más pesados son estos cuantos, tanto menor es el radio de las fuerzas correspondientes. Como ejemplo, pueden señalarse los llamados mesones K descubiertos relativamente poco tiempo atrás. Su masa es aproximadamente 970 mayor que la del electrón (lo que constituye más que el triple la masa del mesón π) y, por consiguiente, las interacciones transferidas por nuestras partículas deben dejarse sentir a distancias tres vaces menores que las relacionadas con los mesones π*.

Existe otro problema de trascendental importancia que no se puede dejar de destacar cuando se examina la cuestión sobre las fuerzas nucleares. He aquí que hemos indicado: el protón emite un mesón π absorbido por el neutrón vecino. ¿Y por qué, hablando con propiedad, solamente

---

* El papel de la interacción K—mesónica es especialmente sustancial en los llamados hipernúcleos (sobre los cuales se dijo ya varias palabras), es decir, en los núcleos en cuya composición, además de protones y neutrones, entran también hiperones, partículas superpesadas con las masas iguales, aproximadamente, a 2200, 2300 y 2600 masas electrónicas.

por el vecino? Es que el propio protón se transforma en este caso en neutrón que no es en nada peor que todos los circundantes, de modo que él mismo puede capturar su propio mesón. Un proceso análogo es posible también para el neutrón*. Como resultado debe originarse una interacción, —y no sólo con otras partículas, sino también consigo mismo,— semejante a la autoacción electromagnética. Es de especial importancia el hecho de que tanto el protón, como el neutrón, en correspondencia con este cuadro, deben considerarse como cierto sistema sumamante complejo: en el centro se encuentra "algo", cierto centro alrededor del cual se dispone una nube de mesones incesantemente emitidos y de nuevo absorbidos. (Observemos, a propósito, que la interacción de diferentes partículas puede considerarse como mezclado parcial de estas nubes.) Los mesones están cargados, lo que significa que se puede plantear el problema sobre la distribución de la carga eléctrica en esta nube. ¡Pero sí éste es un paso para conocer la *estructura* de las partículas elementales! Mientras tanto, todavía ayer, la palabra "elemental" fue para mucha gente sinónimo de "sin estructura". Y las palabras acerca de la estructura de las partículas no son, únicamente, las elucubraciones de los teóricos. En los magníficos ensayos de Hofstadter se logró hallar esta estructura por vía experimental. Ahora ya conocimos esencialmente más sobre la estructura de las partículas que a partir de estos experimentos.

* De lo expuesto se desprende, en particular, que entre el protón y el neutrón no existe una divisoria ostensible. Éstos, más bien, se deben examinar como diferentes estados de una misma partícula (los físicos dicen: estados de carga).

Siendo así, ¿a qué atribuir, entonces, las palabras sobre las "manchas blancas" con las cuales hemos comenzado este capítulo? Es que, aparentemente, los éxitos de la teoría son tan grandes e indiscutibles. ¡No sólo resultan explicadas las interacciones nucleares, sino que logramos, incluso, "echar una ojeada" al interior de las partículas! Sí, se logró hacer todo ello —téngase en cuenta, además, que no teníamos la posibilidad de mencionar aquí otras muchas cosas— pero se logró hacerlo solamente dentro de los marcos de la descripción cualitativa. Lamentablemente, sólo en forma cualitativa, ¡y no cuantitiva!

Apenas los físicos tratan de traducir los razonamientos aducidos al riguroso lenguaje de ecuaciones y fórmulas, inmediatamente emerge todo un bosque de dificultades muchas de las cuales (se puede decir que casi todas) todavía no se ha conseguido superar. También se dan puntos donde la teoría, por ahora, no puede jactarse siquiera de descripción cualitativa.

Tampoco sabemos otras muchas cosas que a primera vista parecen en sumo grado más sencillas. Ni siquiera estamos bien enterados de la forma de diferentes núcleos y de la disposición de las partículas en éstos.

Desde luego, en la descripción de la estructura y, por lo tanto, también de la forma del núcleo se alcanzaron éxitos considerables.

Los núcleos (en todo caso, los núcleos pesados) son sistemas constituidos por muchas partículas que están en una interacción muy fuerte. A los teóricos no es fácil arreglárselas con estos sistemas. Se ven obligados a construir teorías aproximadas. Una de las primeras teorías de este tipo fue la de la gota o hidrodinámica de Niels Bohr. El núcleo, en muchos aspectos, se asemeja

a una gota. Las moléculas en el líquido están ligadas por las fuerzas de corto alcance; también es pequeño el radio de acción de las fuerzas de atracción de las partículas en el núcleo (aunque su naturaleza es completamente distinta.) Pero el asunto no se limita a ello.

En el líquido, a una molécula (al igual que en el núcleo a un nucleón) siempre corresponde, aproximadamente, un mismo volumen. El parecido del aspecto exterior de las interacciones hace muy seductor el enfoque hidrodinámico del núcleo y, además, como resultó, muy fructífero. El modelo de la gota es cómodo para la descripción de la fisión nuclear, fórmulas útiles se obtienen también para las oscilaciones de los núcleos-gotas, es decir, para la transición a los estados de excitación. Pero se sobreentiende que en una serie de casos el enfoque hidrodinámico refleja con demasiada aproximación las propiedades de los núcleos. En particular, con el enfoque hidrodinámico se resuelve de modo unívoco el problema sobre la forma de los núcleos: una gota no excitada tiene simetría esférica. En la realidad, es un modelo sumamente inexacto.

El segundo paso en la teoría del núcleo está relacionado con el llamado modelo de capas. El lector recordará que los electrones en los átomos se disponen por capas, por envolturas, cada una de las cuales posee una energía determinada, momentos magnético y mecánico, etc.

Resulta que dentro de los márgenes de aproximaciones racionales es posible introducir las ideas sobre las capas también en los núcleos.

Como ya se ha señalado, el núcleo es un sistema de muchas partículas con vínculos intrínsecos muy complejos, los cuales, además, varían cada instante. Pero, precisamente, los sistemas de este tipo se caracterizan mediante magnitudes promediadas. Vamos a pensar ahora cuál es la

acción promediada ejercida sobre cada partícula. En el cuerpo del núcleo cada partícula experimenta, *en promedio, un influjo idéntico por todos* los lados (¡se siente la influencia solamente de *los vecinos más próximos!*), de modo que estos influjos se compensan mutuamente. Ahora bien, *en el límite* aparacen fuerzas dirigidas al interior del núcleo. Resulta que cada partícula se encuentra *como si fuera en un pozo* por cuyo fondo puede rodar sin obstáculos, pero cuyas paredes no la dejan salir afuera. Si ahora, guiándose por todas las reglas de la teoría cuántica, se resuelve el problema sobre el *movimiento* de las partículas en el "pozo de potencial", tomando en consideración, además, el principio de exclusión de Pauli, resultará que los nucleones deben disponerse en el núcleo en ciertas capas.

El modelo de capas en muchos aspectos es más rico que el de la gota líquida. Sin embargo, estos dos modelos no deben oponerse uno al otro, sino considerarse como recíprocamente complementarios.

De la teoría de capas se infiere que los más estables son los núcleos que tienen totalmente "completado" el número entero de capas. A éstos pertenecen, por ejemplo, la partícula α, el núcleo *de oxígeno* $^{16}_{8}O$, etc. Pero he aquí, digamos, el núcleo $^{17}_{8}O$. En éste apareció un neutrón "de sobra". Dicho neutrón sólo puede "agarrarse" en algún lugar por sobre de las capas llenas. Pero tampoco las capas quedarán invariables: es que éstas se encontraron en la esfera de acción de una nueva partícula y, además, móvil. Se obtiene un cuadro complejo en que se entrelazan los rasgos tanto del modelo de capas, como del de la gota líquida.

En lo que atañe a la forma, después de todo aquello que acabamos de decir queda claro que

ésta, hablando con propiedad, es muy complicada. Como demostró A. S. Davydov, la forma de los núcleos repercute esencialmente en sus propiedades y puede estudiarse muy a fondo.

El resultado más interesante que deriva del modelo de capas del núcleo es la predicción de la posibilidad de existencia de núcleos superpesados relativamente estables.

Los números de protones o de neutrones en las capas nucleares totalmente llenas se suelen denominar números "mágicos".

En el sistema periódico de Mendeléiev se incluyen entre los "mágicos" los números 2, 8, 20, 50, 82, 126. Son particularmente estables los núcleos con las capas totalmente completadas tanto protónicas, como neutrónicas. Como tal núcleo "doblemente mágico" se presenta, por ejemplo, el de plomo con el número de protones $Z=82$ y el de neutrones $N=126$. A finales de los años 60 una serie de científicos demostraron teóricamente que el núcleo "doblemente mágico" siguiente al plomo debe contener 114 protones y 184 neutrones. Un cálculo que necesita, por supuesto, una ulterior corrección, testimonia que este núcleo será relativamente estable respecto a la fisión y a las desintegraciones α y β. La evaluación aproximada del tiempo de vida del núcleo en cuestión arroja el resultado de 10^5 — — 10^8 años, o sea, un plazo muy, pero muy grande. Relativamente longevos deben ser también los núcleos con los números cercanos de neutrones y protones. Y todo esto se sugiere en las condiciones en que los elementos transuránicos mucho más ligeros obtenidos artificialemente viven muy poco, y el tiempo de su vida disminuye con el aumento de la carga del núcleo. Así, por ejemplo, el mendelevio ($Z = 101$) vive cerca de 1000 s, y el kurchatovio ($Z = 104$) tan sólo medio segundo. Únicamente para el elemento 105 el

tiempo de vida resulta ser un poco mayor que para el 104. En lo fundamental, todos estos núcleos se destruyen debido a la fisión. De este modo, los núcleos superpesados relativamente estables están separados de los núcleos estables relativamente ligeros por una zona de inestabilidad, formando una especie de "islotes" de estabilidad. Tras el "islote" de estabilidad en los alrededores de $Z=114$ se encuentra otro "islote" formado por los núcleos con la carga $Z=126$.

Ante los científicos se planteó el problema de obtener estos núcleos superpesados por vía artificial o de hallarlos en la naturaleza. Los núcleos con $Z = 114$ o con $Z=126$ se pueden obtener durante las colisiones de dos iones pesados. Dichos iones deben poseer una energía lo suficientemente grande comunicada a los mismos por los aceleradores. Sin embargo, el nuevo núcleo aparecido después de la fusión de dos núcleos se encontrará en estado de excitación. Además, en el primer momento resultará ser fuertemente deformado y poseerá un alto momento de rotación. Debido a estas causas, la estabilidad de este núcleo será mucho menor que la del núcleo no excitado, y también será grande la probabilidad de su desintegración. Por esta razón, no es de extrañar que hasta la fecha no se vieran coronados con el éxito todos los intentos de obtener, valiéndose de los aceleradores núcleos superpesados estables.

Hubo intentos de descubrir los núcleos pertenecientes a los "islotes" de estabilidad en los minerales de la Tierra, de la Luna y en los meteoritos. También se realizaban búsquedas en la componente nuclear pesada de los rayos cósmicos. A mediados del año 1976, primeramente en los periódicos y, luego, también en las revistas científicas apareció la comunicación de que un grupo de científicos norteamericanos logró

descubrir en los cristales microscópicos de monacita núcleos con cargas 116, 124 y 126. Estos núcleos no podían dejar de poseer grandes tiempos de vida, por cuanto durante millones de años se encontraron en la corteza terrestre. Mas, lamentablemente, esta noticia sensacional, igual que otras muchas, resultó ser falsa. Una comprobación rigurosa no confirmó la existencia de los elementos superpesados.

Sea como fuere, actualmente se siguen efectuando trabajos de síntesis de los elementos superpesados. Se han calculado las configuraciones de las capas electrónicas de estos elementos con tal de que sea posible predecir sus propiedades químicas. El conocimiento de las propiedades químicas de los elementos prestará gran ayuda durante su identificación.

El lector se habrá fijado, probablemente, que todas las deliberaciones acerca de la estructura del núcleo no han tocado, en absoluto, la teoría mesónica de las fuerzas nucleares.

Por ahora, no existe una teoría dinámica completa basada en el análisis detallado del cuadro físico de las interacciones.

Ideas nuevas de principio que se pueden denominar de quarks y gluones permitieron también aquí comprender muchas cosas que todavía hace poco eran inconcebibles para la razón. Pero sobre estas cosas se tratará más adelante.

Atravesando los abismos
De creación y destrucción,
Del átomo a las estrellas
Un puente tiende la razón.

E. Verhaeren, *Investigaciones*

CAPÍTULO VI

INTERACCIONES DÉBILES

1. Desintegración de las partículas elementales y el neutrino

Un vedado para los escritores de ciencia-ficción

Hay muchos libros de ciencia-ficción cuyos autores dotan a los protagonistas de capacidad de "desconectar" diferentes fuerzas. En estos libros figuran "pantallas gravitacionales" a través de las cuales no se deja sentir la gravitación, rayos que destruyen los enlaces químicos, aparatos que eliminan el rozamiento, etc.

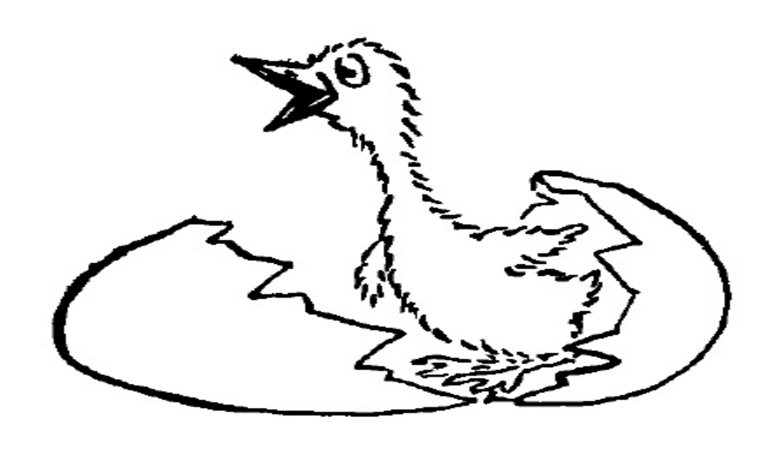
Sin embargo, puede ser que nadie todavía trató de imaginar cuál sería el mundo sin las interacciones débiles.

Y aquí, precisamente, hay terreno para el vuelo de la fantasía.

No en vano las interacciones débiles llevan también otro nombre, el de interacciones de "desintegración". La desintegración de casi todas las partículas inestables (ya hemos hecho mención de ésta al discutir las transformaciones mutuas de las partículas unas en otras) guarda relación precisamente con estas interacciones.

Por lo tanto, si por arte de magia estas interacciones pudieran desaparecer, se suspenderían de inmediato un gran número de tipos de transformaciones de las partículas que nosotros conocemos. Tanto los neutrones, como muchos mesones e hiperones se convertirían en estables, teniendo la posibilidad de existir tanto tiempo como se quiera.

¡Cuáles no fueran los milagros a que esto llevara! He aquí, por ejemplo, el sistema periódico de los elementos. Hoy tenemos en éste 106 casillas, 106 elementos químicos registrados por los científicos.



¿Y por qué no más? ¿Existen los elementos con los números 2000, 10 000, etc.?

Tales elementos no existen, y, más aún, estamos seguros que nunca aparecerán en las casillas de la tabla de Mendeléiev*:.

Es de suponer que la causa de ello es comprensible para toda persona que haya leído con atención el capítulo anterior de este libro.

Se trata de que el número del elemento coincide con la cantidad de protones en su núcleo. Cuanto mayor es esta cantidad, tanto mayores son las fuerzas culombianas que tienden a rom-

* *Aquí no tocamos, por ahora, el problema sobre las gigantescas formaciones de neutrones: las estrellas de neutrones, acerca de las cuales hablaremos más tarde.*

per el núcleo. Solamente una capa intermedia muy considerable de neutrones es capaz de compensar su acción; una capa que no añade nada a las fuerzas de repulsión, pero la cual cimienta el núcleo por medio de fuerzas de atracción mesónica.

Aparentemente, al "diluir" los protones con un número suficiente de neutrones, es posible vencer la inestabilidad culombiana en todo núcleo. Pero aquí es necesario acordarse de la inestabilidad de los neutrones... En cuanto su cantidad llega a ser demasiado grande, surge la probabilidad de la desintegración β la cual se torna tanto mayor cuanto más considerable es la parte relativa de los neutrones en el núcleo.

Así, pues, los núcleos (con $Z \approx 100$) no pueden ser estables. Esta circunstancia bien conocida conduce, en particular, a que cuando se trata de los elementos muy pesados, éstas, hablando con propiedad, no se deben descurbrir, sino "fabricar". Estos elementos en forma acabada, no se pueden hallar ni en las entrañas de la Tierra, ni en la atmósfera, ni en las profundidades del océano. Su tiempo de vida es demasiado corto como para darse a encontrar. Los científicos se ven obligados a recurrir al bombardeo de los núcleos con iones rápidos y seguir la cadena de complejas transformaciones nucleares antes de que los sensibilísimos instrumentos tengan tiempo para registrar, en un instante efímero, al nuevo elemento que se forma en cantidades inconcebiblemente pequeñas que, a veces, se cuentan por átomos individuales.

Bueno, ¿y si no existiese la desintegración de los neutrones, si estas partículas obedientes a nuestra varita mágica, se convirtiesen en estables? Es que entonces nada podría impedir el crecimiento de su número. La tabla de Mendeléiev se completaría consirablemente. Aunque, por

cierto, no hasta la infinitud, como parece a primera vista. Recuerden la saturación de las fuerzas nucleares. Los núcleos-gigantes serían muy poco resistentes, descomponiéndose con facilidad en fragmentos. Pero, al tomar medidas especiales contra la aparición de empujes y sacudidas, es posible, en cierto grado, "protegerse" de la fisión. A lo mejor, el lector, después de asimilar todo lo expuesto, se representará el siguiente cuadro: en la puerta del laboratorio se ve la insripción: "Atención, las interacciones débiles están desconectadas". En la mesa de laboratorio, bajo una campana opaca (para excluir la "sacudida" por acción de la luz) se encuentra un cuerpo amorfo de tamaño de manzana nadando en helio líquido (pues la temperatura también se debe hacer lo más baja posible para debilitar al mínimo los empujes calóricos). Sin embargo, no es el caso para hablar de que el cuerpo está nadando: éste es inconcebiblemente pesado —pesa casi un millón de toneladas— y no se desmorona en fragmentos bajo la acción de su propio peso, al parecer, exclusivamente por consideraciones de humanismo. Es que basta que en esta "manzanita" aparezca una fisura de una milmillonésima fracción de milímetro de grueso para que los enlaces nucleares (¡de corto alcance!) resulten rotos y las fuerzas monstruosas de repulsión electrostática arrojen los fragmentos con una velocidad frenética.

En la campana, una decorosa inscripición: "El elemento Nº 1 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000" y algo referente al seguro sobre la vida.

Se sobreentiende que semejante cuadro, incluso en un mundo fantástico sin interacciones débiles, es fantástico.

Se debe tomar en consideración una multitud de circunstancias de que nos hemos "olvi-

dado". Sea como fuere, si no existiesen las interacciones débiles, si el neutrón fuese una partícula estable, la tabla de los elementos continuaría hasta centenares y, quizá, miles de números.

Pero cambios todavía más sorprendentes ocurrirían con la tabla de los isótopos.

En el capítulo dedicado a las fuerzas nucleares se decía que los isótopos, teniendo igual número de protones, se diferencian por la cantidad de neutrones en el núcleo. El isótopo puede ser estable solamente en el caso de que la relación entre el número de protones y el de neutrones queda dentro de los límites de una norma estable. Cuando el número de neutrones llega a ser mayor que permite esta norma, comienza la desintegración β. Si no fuera por las interacciones débiles, no habría motivo para temer esta desintegración, y se acrecentarían colosalmente las posibilidades de aumentar el número de neutrones en el núcleo. De ser así, el hidrógeno se haría poseedor no de cuatro isótopos (entre los cuales sólo son estables el hidrógeno ordinario y el deuterio), sino, prácticamente, de una cantidad infinita de éstos. Es verdad, sin embargo, que en algún lugar, en la región del milésimo isótopo aparecería una nueva causa de inestabilidad relacionada con el hecho de que el electrón atómico comenzaría rozar el gigantesco núcleo alrededor del cual está girando. Además, empezaría a ejercer su influjo la inestabilidad térmica de la que se ha hablado ya, etc.

Pero éstas son, por decirlo así, circunstancias accesorias respecto a la situación intranuclear.

En aquel maravilloso mundo a que nos llevó la fantasía sería capaz de existir y ser estable otro núcleo exótico. Deberíamos asignarle la casilla cero (anterior al hidrógeno) en la tabla de Mendeléiev. Este núcleo, en general, no ten-

dría protones. En efecto, de no desintegrarse los neutrones, resultaría que uno, dos, un centenar, mil millones de neutrones podrían existir como sistemas estables. Sería posible considerarlos como núcleos, isótopos de aquel elemento fantástico el cual, hablando con propiedad, no posee átomos en el sentido habitual de esta palabra. Es que los electrones no se atraen por los neutrones. ¡Átomos sin electrones y sin propiedades químicas! No pueden negar que, en efecto, es algo insólito.

Sin embargo, ¿por qué hablamos solamente de los neutrones? Es que, como teníamos la ocasión de cerciorarnos, nos vemos obligados a escribir la palabra "inestable" casi en cada casilla de la tabla de las partículas elementales. Ahora bien, como se ha recalcado reiteradas veces, la inestabilidad está relacionada, con pocas excepciones, con aquello que nosotros, por ahora de un modo algo convencional, denominamos interacciones débiles. De no existir estas últimas, no solamente los neutrones, sino también los mesones μ, los mesones π cargados, los mesones K, así como las partículas más pesadas que los protones y los neutrones —estas partículas se unen bajo el nombre común de "hiperones"— se convertirían en estables. He aquí, por ejemplo, los mesones μ. En muchos aspectos se parecen en gran medida a los electrones y positrones. Entre los mismos hay cargados tanto positiva, como negativamente. Pero el parecido no se agota con ello. Éste es tan grande que a los físicos en muchas ocasiones comienza a parecer que, por ejemplo, el mesón negativo, en esencia, no es sino el mismo electrón el cual solamente "ha cobrado peso" a costa de ciertas causas que por ahora ignoramos. En efecto, el mesón μ pesa 207 veces más que el electrón.

¿Y qué se puede decir en cuanto a la desinte-

gración? —preguntará el lector—. ¿Acaso no es una diferencia esencial? El electrón es estable, mientras que el mesón μ vive millonésimas fracciones de segundo. A esta pregunta se puede contestar con el siguiente ejemplo. Figúrese un átomo en estado excitado. Este átomo excitado también es inestable: por regla general, se desintegra casi instantáneamente en átomo no excitado y fotón. Y al mismo tiempo nosotros no decimos que los átomos excitado y no excitado son sistemas diferentes, sino preferimos emplear la expresión: un mismo sistema en diferentes estados. ¿Tal vez, también el mesón μ sea un electrón excitado?

Sin embargo, esta cuestión sugestiva de por sí nos desvió algo del tema. Estamos bien enterados de cuál es el "trabajo útil" que cumplen los electrones. Éstos forman la envoltura de los átomos y, por consiguiente, determinan, en particular, las propiedades químicas. El movimiento de los electrones condiciona las corrientes en los metales; el electrón es el protagonista, el personaje más importante en todo tipo posible de aparatos de haz electrónico, comenzando con el más simple diodo (lámpara de dos electrodos aplicada en los rectificadores de corriente eléctrica) y terminando con microscopios electrónicos y betatrones. Se puede decir que a los electrones pertenece el papel primordial en la ciencia y técnica modernas. ¿Y no podrían los mesones μ desempeñar el mismo papel? Les impide hacerlo la inestabilidad... Y si no fuese por ella, todas las funciones de los electrones las serían capaces de asumir —no sin éxito y, a veces, incluso con ciertas ventajas— los mesones μ.

No todo lo expuesto se refiere al ámbito de la fantasía (si no existieran las interacciones débiles...). Por ejemplo, se han hallado, en la realidad, átomos cuyos electrones son sustituidos

por los mesones μ (negativos, por supuesto). A pesar de lo poco que viven semejantes "mesoátomos", los investigadores lograron, en todo caso, fotografiar su espectro en su totalidad, cosa que es muy interesante por cuanto la órbita de los mesones se encuentra 207 veces más próxima (o sea, tantas veces como el peso de los mesones supera el de los electrones) al núcleo que la electrónica. Por esta cuasa, el mesón percibe con mucha más fuerza todas las particularidades de la estructura del núcleo, *informándonos sobre* éstas por medio de su espectro.

Por cuanto ya comenzamos la conversación acerca de los sistemas en cuya composición entran los mesones μ, vale la pena mencionar otra curiosa posibilidad. Figúrese algo como el átomo de hidrógeno, sólo que, supongamos, el papel del núcleo lo desempeña el mesón μ positivo. Si el mesón μ fuese estable, de semejantes átomos se podrían formar moléculas. Se podrían obtener compuestos químicos inusitados, algo así como por ejemplo, "agua superligera" etc.

El tema "el mundo sin interacciones débiles" ofrece un campo tan vasto para la imaginación que podríamos todavía durante mucho tiempo ocuparnos en la discusión de distintas cosas prodigiosas.

Sin embargo, aún así dedicamos un lapso muy largo a la fantasía. Lo único, tal vez, que merezca ser mencionado una vez más, son los hiperones.

De ser estables los hiperones, el "surtido" de núcleos atómicos se enriquecería sobremanera. Sería posible la existencia de núcleos estables constituidos por una mezcla de neutrones, protones y diferentes hiperones, así como de núcleos formados únicamente por hiperones. A partir de hiperones neutros se podrían construir fragmentos electroneutros de sustancia hipernuclear.

Cuesta trabajo hasta pronunciar estas palabras.

Sea como fuere, consagramos a la fantasía ya bastante tiempo. El lector que ya tiene conocimiento del comienzo de este capítulo sería capaz, probablemente, de figurar, aunque sea en pequeño grado, cuán esenciales son para la fisonomía de nuestro mundo las interacciones débiles. Cuántas "prohibiciones" de toda clase (y simplificaciones, pensaron probablemente algunos lectores) arrastran éstas en pos suyo. Así, pues, el nombre de "débiles" no significa en absoluto la insignificancia de las manifestaciones de estas interacciones.

Al mismo tiempo, para esta denominación existen motivos de peso. Para comprenderlos, tendremos de conocer más de cerca algunos fenómenos importantes.

Un cuarto de siglo de existencia fantasmal

Hace unos cincuenta años en las publicaciones científicas hizo su aparición la palabra "neutrino". Es un diminutivo cariñoso de "neutro". Se dio este nombre a una nueva partícula cuyo destino fue convertirse en la más admirable y popular, quizá, en la familia de las partículas elementales.

Entró en la ciencia por un camino no ordinario; sus propiedades resultaron ser sorprendentes y, finalmente, es fuera de lo común el papel que le pertenece en la naturaleza.

Se vieron obligados a "inventar" esta partícula para prevenir contra el derrumbamiento todo el fundamento en que descansaba la física, para salvar las leyes de conservación. Y solamente en 1956 apareció la demostración experimental directa de su existencia. Durante cinco lustros el neutrino llevó una existencia fan-

tasmal en las páginas de los libros y artículos científicos. Aunque por aquella época nadie había "visto" esta partícula, se le concedía un lugar importante en las transformaciones mutuas de otras muchas. Y ante todo (aunque sea en el *sentido cronológico*), del neutrón.

Ya hemos hablado mucho sobre la desintegración β del neutrón. Los instrumentos detectan sin especial dificultad el protón y el electrón que se forman en esta desintegración. Pero he aquí lo que es extraño: si se mide la energía del neutrón antes de la desintegración y se compara con aquella que obtienen el protón y el electrón formados de este neutrón, se pone de manifiesto una divergencia. Al parecer, ¡desaparece no se sabe dónde una parte de energía! De la misma manera se descubre una paradójica ausencia de conservación del impulso y del momento de la cantidad de movimiento.

Las leyes de conservación son los principios más fundamentales que los físicos lograron establecer sobre la base de innumerables experimentos y su interpretación. Pueden cambiar los métodos concretos de descripción del movimiento. Así, por ejemplo, para relevar la descripción newtoniana vino la mecánica cuántica, pero las leyes de conservación siempre permanecieron inconmovibles. Más aún, ellas mismas servían de faro que ayudaba a los científicos avanzar en el campo de lo inexplorado.

Y he aquí que el fenómeno de la desintegración β, en apariencia, indicó directamente su inconsistencia. En la física surgió una situación que se podía llamar "estado de emergencia".

Las opiniones de los científicos en aquel período se dividieron. Algunos de ellos procuraron avenirse a la idea de infracción de las leyes de conservación, alegando que dichas leyes están establecidas para el mundo de "objetos grandes",

para el macromundo, y no para las partículas elementales y pueden cumplirse tan sólo "en término medio". Tal enfoque, además de que no eliminaba todos los problemas, no podía satisfacer a la mayoría de los físicos también por otra causa: no contenía un programa positivo para el ulterior progreso.

El aspecto mucho más atractivo lo presentaba la hipótesis del teórico suizo Wolfgang Pauli. ¿Y si durante la desintegración del neutrón —se preguntó Pauli— junto con el protón y electrón nace una partícula más, que arrastra consigo la energía, el impulso y el momento de la cantidad de movimiento que faltan? No observamos esta partícula, pero este hecho es fácil de explicar. Basta con figurar que la misma no tiene carga eléctrica y su masa en reposo es muy pequeña o, en general, es igual a cero. En este caso, no será capaz de arrancar los electrones a los átomos, desintegrar los núcleos y, en general, producir todas aquellas "destrucciones" que nos permiten juzgar siempre sobre la presencia de partículas.

Por supuesto, no se puede afirmar que esta partícula, en absoluto, no entra en interacción con nada ni nadie. Lo que fue engendrado, luego puede ser también absorbido. Siendo de otro modo, la invención del neutrino significaría la misma renuncia a las leyes de conservación, sólo que en una forma más sofisticada y velada. Es que la energía se perdería con el neutrino sin dejar huella y para siempre.

Pauli conjeturó que el neutrino está simplemente en una interacción muy débil con la sustancia, debido a lo cual puede atravesar una capa muy gruesa de ésta sin revelar su presencia. Actualmente sabemos cuánta razón tenía Pauli al sugerir esta hipótesis. El neutrino, en efecto, es la más "inatrapable" partícula. Pasa libremente a través del globo terráqueo y es capaz de pene-

trar a través del Sol. Y sólo si nos imaginásemos una monstruosa bola de hierro, de tamaño de nuestra Galaxia, en esta bola el neutrino se absorbería casi seguramente.

Como "padrino" de esta partícula a la cual se dio el nombre de neutrino intervino el gran físico italiano Fermi. Fue, precisamente, él quien "legitimó" la partícula en cuestión, introduciendo el neutrino en el marco de la teoría cuántica existente.

Los trabajos de Fermi, así como una larga serie de trabajos de sus seguidores parece esclarecer totalmente la situación. Durante largo tiempo la masa en reposo del neutrino parecía igual a cero, a semejanza del corpúsculo de la luz: el fotón. El sentido de ello es simple: no hay neutrino que esté en reposo. Inmediatamente después de su nacimiento los neutrinos se mueven a la velocidad de la luz.



También se conoce bien el espín del neutrino. Dicho espín resultó idéntico al del protón o del electrón. Cada vez se acumulaba mayor cantidad de datos acerca del neutrino. Los teóricos vaticinaron que debía existir su doble, como existe

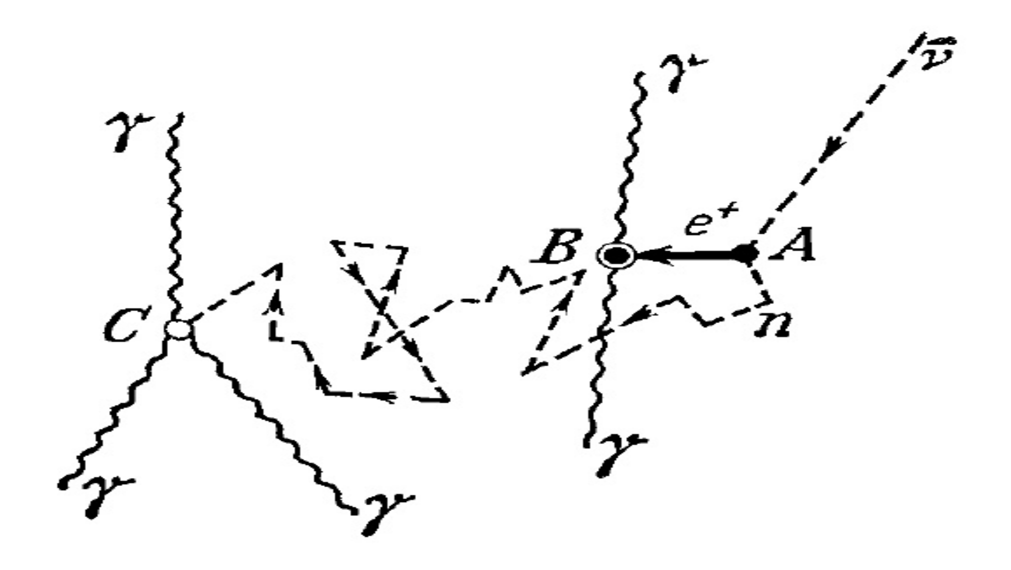
el "doble" del electrón: el positrón. El nombre para el doble se halló por sí mismo: el antineutrino. Reviste cierto carácter curioso el hecho de que las partículas que se forman durante la desintegración β del neutrón, por una serie de consideraciones, no deben llamarse neutrinos, sino antineutrinos.

Los experimentadores acumularon muchos datos acerca de las transformaciones de las partículas en las cuales participan neutrinos y antineutrinos. La lista de estas transformaciones (en otro lugar relataremos algo más acerca de las mismas) es actualmente ya bastante amplia. Resulta que no solamente la desintegración β del neutrón, ni mucho menos, transcurre con la participación de estas partículas invisibles. Pero, ¿cómo capturarlas? Los experimentadores lograron hacer también esto. El objetivo fue alcanzado por medio de un experimento cuya idea fue elemental. Junto al reactor nuclear en que se efectuaba una enorme cantidad de desintegraciones β (y, por consiguiente, se formaba un gran número de antineutrinos), se situó una "caja" maciza. Sus paredes se confeccionaron de un material tal (plomo y parafina) y eran tan gruesas que a través de las mismas, en el interior de la "caja", no podía penetrar, a ciencia cierta, ninguna partícula. Ninguna, a excepción del antineutrino. Es que para el antineutrino, prácticamente, no existen barreras. Los flujos de antineutrinos procedentes de la caldera se precipitan por todos los lados, en particular, a la "caja". Estos flujos son tan colosales que, debido al carácter ingente del número de estas partículas, varios actos de absorción pueden tener lugar en un plazo relativamente corto aunque cada partícula individual de antineutrino tiene una probabilidad ínfima de absorberse por la sustancia que rellena la "caja". De acuerdo con

los cálculos de los científicos el proceso debía desarrollarse de la siguiente manera. Supongamos que el antineutrino ($\overline{\nu}$) choca contra uno de los protones en el punto A (la "caja" estaba llena de agua) obligándolo a transformarse en neutrón con la formación simultánea de un positrón. El positrón se aniquila inmediatamente con un electrón, con el "primero que encuentre" (en el punto B), produciéndose dos cuantos γ. Estos últimos pasan a través de una capa de material centelleante líquido (sustancia que comienza a centellear al pasar a través de ésta cuantos γ) que se dispone junto a las paredes interiores de la "caja". El centelleo se registra inmediatamente por medio de 150 fotomultiplicadores, instrumentos que reaccionan a los más débiles impulsos luminosos. ¿Y el neutrón que se formó? Después de un breve deambular por el agua éste debe ser capturado por el cadmio (punto C) introducido especialmente en la "caja", lo que también viene acompañado de formación de los cuantos γ. Como ve el lector, la captura del antineutrino debe acompañarse con un cúmulo de acontecimientos. Así presagiaba la teoría. Mas ¿qué dirán los instrumentos? ¿Van a registrar éstos todo lo que se ha predicho?

Y los instrumentos, en efecto, registraron finalmente aquello que, a pesar de la gran seguridad de los físicos seguía siendo por lo menos hipotético. La partícula *invisible* se delató, cayendo en la "trampa" preparada por los científicos.

Parece que los físicos lograron "arreglárselas" con el neutrino y antineutrino: los teóricos describían con seguridad estas partículas y los experimentadores aprendieron a detectarlas con plena certeza. Sin embargo, pronto resultó que la naturaleza reservó a los investigadores una sorpresa de turno, como si quisiera hacerles



recordar que no pueden permanecer tranquilos cuando se trata del neutrino.

El neutrino como salvador y el neutrino como destructor

El neutrino, con su "nacimiento" salvó las importantísimas leyes de conservación. No obstante, el mismo neutrino destruyó otra ley de valor universal. Hasta el año 1956 no había persona a la que ocurriese poner en tela de juicio la simetría especular de la naturaleza. Esto significa que cualquier proceso que se opera en la naturaleza, según se consideraba, puede desarrollarse también de tal manera como se lo ve en el espejo. Correspondientemente, la imagen especular de cualquier objeto también es un objeto posible de la naturaleza. Es cierto que una persona que examina su imagen en el espejo podría, al pensarlo a fondo, captar también algunos detalles curiosos: lo derecho se transforma en lo izquierdo. El "doble especular" escribe con la mano izquierda, pero también existen zurdos; abotona la chaqueta al lado izquierdo, pero sólo la costumbre hace a los hombres proceder de otro modo; el corazón del "doble"

está situado a la derecha, pero, en fin de cuentas, se dan casos, aunque son muy raros, cuando semejante disposición del corazón se encuentra entre los hombres. En resumidas cuentas, aquí al parecer, nos cercioramos de que en el país "Detrás del espejo" no hay ningunas maravillas a semejanza de aquellas que vio Alicia: allí todo tiene el mismo aspecto que podría tener también en el país "Delante del espejo".

Existe la simetría especular, simetría de lo derecho y lo izquierdo. Pero, ¿es que dicha simetría existe siempre?

Durante un largo período no hubo nada que hiciera ponerlo en duda, y lo acostumbrado parece con frecuencia incuestionable. El estudio del neutrino recordó a los físicos una vez más que en la cienicia no hay verdades que se sobreentienden.

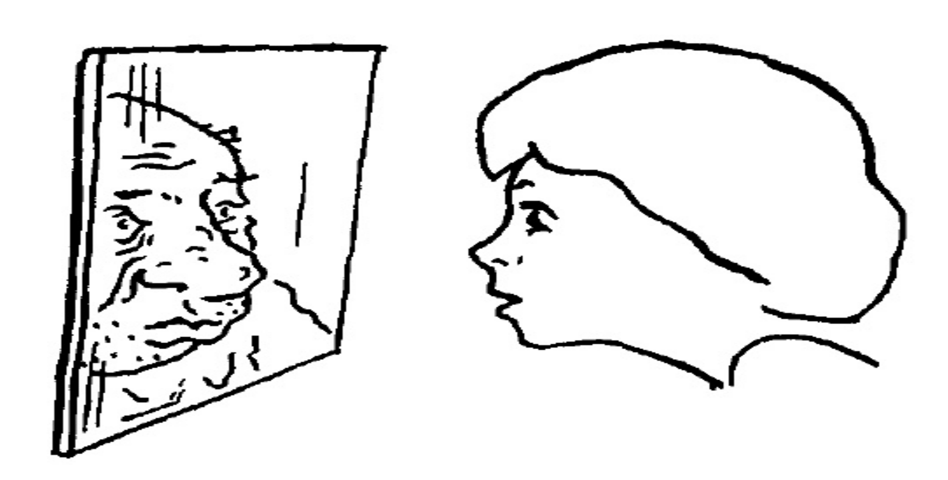
Ya hemos hecho mención de que el neutrino posee el espín, el momento propio de la cantidad de movimiento. Hablando en el patente lenguaje



"clásico" la partícula parece como si estuviera girando (recordemos una vez más el ejemplo citado antes, sobre la bala disparada de un arma de ánima rayada). Los neutrinos que se forman durante la desintegración del antineutrón resultan girados de una manera estrictamente determinada: la dirección de su "rotación" forma el tornillo levógiro con la dirección del movimiento. Aquí no se da excepción alguna (como, por ejemplo, el nacimiento de personas con el

corazón en la parte derecha del pecho). Pero es una infracción evidente de la simetría especular, el tornillo con rosca izquierda parecerá en el espejo como uno con rosca dextrorsa. Pero el neutrino "dextrógiro" no existe. El neutrino es el único objeto que no posee, por decirlo así, imagen especular.

¿Quiere decir esto que, al colocar el neutrino delante de un espejo (y admitir, por un instante, que por cierto milagro lo podemos ver), no ad-



vertiremos, en general, ninguna imagen? No, no afirmamos semejante cosa. Se trata de que esta imagen posee unas "propiedades" tales (si, en general, se puede hablar de este modo sobre una imagen) que el neutrino no podrá poseer nunca y en ningunas circunstancias. Pero, de una forma asombrosa, estas propiedades son las mismas que posee el antineutrino.

Así, pues, la imagen de la partícula neutrino en el espejo es otra partícula, el antineutrino. Si se reflexiona bien sobre el particular, este hecho resulta no menos asombroso que, digamos, un caso hipotético cuando en el espejo como imagen de una encantadora joven aparece un calvo hombre cincuentón.

Claro está que no tenemos en cuenta comparar lo atractivo que son el neutrino y el antineutri-

rino; nuestro propósito es tan sólo subrayar que son partículas diferentes. Diferentes y al mismo tiempo especularmente simétricas. El establecimiento de este hecho significaba el derrumbamiento de aquello que, con seguridad, se podía denominar "simetría simple de lo derecho y lo izquierdo". Todo ello fue una buena sorpresa para los físicos.

En el espejo usted ve su anti-Yo

En nuestro mundo salta a la vista la predominación aplastante de las partículas sobre las antipartículas. Pero, de acuerdo con las leyes fundamentales de la naturaleza las antipartículas y las partículas tienen absoluta igualdad de derechos en cuanto a su existencia. Los antiprotones y los antineutrones pueden formar antinúcleos. Junto con los positrones los antinúcleos son capaces de constituir antiátomos y pedazos de antimateria.

No sabemos casi nada acerca de cómo, de qué modo, la materia del Universo resultó encontrarse separada de la antimateria. Sin embargo, podemos constatar el hecho de semejante separación. Hasta el año 1957 los físicos estaban convencidos de que, al sustituir todas las partículas por antipartículas, obtendríamos un mundo en el cual todo sucedería de la misma manera que en el nuestro. Se consideraba que a la naturaleza le es inherente también una simetría de esta índole.

Sin embargo, recordemos las propiedades del neutrino. Debido al carácter de giro de esta partícula, los procesos en el mundo en el cual los neutrinos están reemplazados por los neutrinos transcurren ya de otra manera. Se desarrollarán como durante la reflexión expecular que, precisamente, cambia el carácter de giro del neutrino.

Por consiguiente, es natural suponer, en particular, que la desintegración del anticobalto procede absolutamente de la misma manera que la del cobalto vista en el espejo.

Al unificar dos asimetrías, la especular y la de carga, llegamos a una simetría más importante que recibió el nombre de principio de paridad o de simetría combinada. De conformidad con este principio la imagen especular de cualquier proceso en la naturaleza también es un proceso probable, siempre que todas las partículas se sustituyan por antipartículas.

Si antes se pensaba que la imagen del cuerpo en el espejo se diferencia del propio cuerpo tan sólo por la sustitución de lo izquierdo por lo derecho, hoy, de acuerdo con las nuevas concepciones, la imagen se comporta de tal modo como si estuviese compuesta de antimateria: las imágenes especulares de los neutrinos son los antineutrinos; la del electrón, el positrón, etc. En el espejo usted ve su anti-Yo: lo izquierdo viene sustituido por lo derecho, y las partículas, por las antipartículas.

Experimentos de Wu

Las propiedades insólitas del neutrino dan lugar a la existencia en nuestro mundo de procesos que transcurren con infracción de la simetría especular. Por primera vez este hecho fue establecido experimentalmente por la física norteamericana Wu, basándose en la idea de Lee y Yang, teóricos que señalaron la posibilidad de tal infracción de dicha simetría. Sin entrar en pormenores, el esquema de estos experimentos es como sigue.

El cobalto radiactivo (^{60} Co) se enfría hasta temperaturas muy bajas y se coloca en un campo magnético intenso. En este caso, todos los nú-

cleos o, por lo menos, una parte considerable de éstos, resultan orientados: su momento magnético, así como el momento de la cantidad de movimiento proporcional al primero, son paralelos al campo magnético. Se mide el número de electrones producidos en la desintegración β que vuelan tanto en la dirección del campo magnético, como en contra de ésta.

Si la simetría especular hubiera existido, este número debería ser igual: es fácil cerciorarse de ello al figurar la instalación "especular". El experimento demostró convincentemente la existencia de una asimetría explícita (60% y 40%, y de a 50%).

Estos experimentos repetidos más tarde en muchos laboratorios del mundo no dejaron lugar a dudas de que la simetría especular se infringe.

Como demuestra la teoría, la violación de esta simetría es posible, precisamente, debido a que los antineutrinos desprendidos del núcleo al mismo tiempo que los electrones siempre están girados de un modo estrictamente determinado: la dirección de su rotación, es decir, el espín, forma un tornillo dextrógiro con la dirección del movimiento.

Posteriormente, se consiguió descubrir la infracción de la simetría especular durante la desintegración de los mesones π y μ. En este caso también aparecen los neutrinos o los antineutrinos. Más aún, en la actualidad sabemos que la simetría especular se quebranta en todos los procesos condicionados por las interacciones débiles. Esto se refiere, por ejemplo, al nacimiento y la desintegración de las partículas Λ^0, aunque en estos procesos el neutrino no participa. Sin embargo, con ello no se agotan, ni mucho menos, las sorpresas.

La no conservación de la simetría combinada

Las magnitudes que caracterizan en la mecánica cuántica el estado de la partícula (éstas se denominan funciones de onda) se comportan de diferente manera durante la operación de la sustitución de partículas por antipartículas con la reflexión especular simultánea. En unos casos la función de onda no varía en general, es decir, la paridad es positiva; en otro caso la función cambia el signo: la paridad es negativa. En todas las transformaciones de las partículas elementales esta paridad combinada del sistema debe conservarse.

De la conservación de la paridad combinada deriva una serie de corolarios que se pueden comprobar en el experimento. Así, en particular, existen dos partículas: mesones K_L^0 y K_S^0, que se diferencian uno del otro sólo por la paridad combinada. Para la partícula K_S^0 ésta es positiva, y para la partícula K_L^0, negativa. Debido a esta circunstancia las partículas se deben comportar de distinto modo durante las desintegraciones. Los mesones K_S^0 pueden desintegrarse en dos mesones π, por cuanto el sistema de dos mesones π tiene paridad positiva, mientras tanto, el mesón K_L^0 sólo es susceptible de desintegrarse en tres, pues la paridad del sistema constituido por tres mesones π es negativa. La diferencia en los canales de desintegración condiciona los diferentes tiempos de vida. La existencia de los mesones K_L^0 es casi cien veces más larga que la de los mesones K_S^0.

En verano de 1964 se difundió la información acerca de nuevas investigaciones las cuales (ya enésima vez) conmovieron el fundamento de la

teoría de las partículas elementales. Durante el estudio de la desintegración de los mesones K neutros se descubrió que a la distancia de 19 metros del blanco en que tenía lugar el nacimiento del haz de mesones K^0 se observó su desintegración no sólo en tres mesones π, sino también, ¡en dos! Este fenómeno se observó con una probabilidad pequeña, de cerca de 0,2%, pero, sea como fuere, de una forma absolutamente indiscutible.

A una distancia tan grande del blanco no podía haber mesones K_S^0; éstos tenían que desintegrarse antes de llegar a los instrumentos que registraban la desintegración. Por lo tanto, fueron los mesones K_L^0 los que se desintegraban en dos mesones π. Este hecho significa la infracción de la simetría combinada durante las interacciones débiles responsables por la desintegración de los mesones K neutros. En los experimentos en cuestión se infringe la ley de conservación, recién establecida.

Por ahora no está claro en qué radica aquí el asunto. Se sugiere que en este caso se manifiesta la acción de ciertas fuerzas superdébiles especiales. Sin embargo, la naturaleza de estas fuerzas es completamente desconocida. Parece que aquí nos encontramos por primera vez con cierta asimetría de la materia y la antimateria.

Dos especies de neutrinos

En el año 1962 en la física del neutrino tuvo lugar otro acontecimiento asombroso. Ya nos hemos referido a los mesones μ. Su parecido con los electrones (y con los positrones, si se trata de μ^+, o sea, de los mesones positivos) atañe también a las interacciones con los neutrinos.

En los experimentos del año 1956 los antineutrinos, al chocar con los protones, engendraban positrones. ¿Y por qué no mesones μ^+? Por la mera razón, contestaban los físicos, que no bastaba la energía. Los mesones μ^+ son aproximadamente 200 veces más pesados que los positrones, por consiguiente, para su formación se requiere una energía las mismas veces mayor. Ahora bien, los antineutrinos que salen del reactor no poseen semejante reserva de energía. ¿Y si la poseyesen? En este caso —contestaban los científicos— los mesones μ^+ se engendrarían con la misma frecuencia, aproximadamente, que los positrones.

Y si, después, una persona escudriñadora y meticulosa continuase preguntando: ¿y si, de pronto, resultaría que también los antineutrinos rápidos procedentes del reactor engendran positrones? —muchos físicos, evidentemente, contestarían a esta pregunta con una sonrisa escéptica. Pues de ser así, tendrían que reconocer que entre los neutrinos de origen "electrónico" y "μ-mesónico" existe una diferencia determinada. Tendrían que reconocer que se dan distintas especies de neutrinos, y semejante cosa no encajaba, en cierto modo, con la concepción del neutrino ya establecida. Incluso en la rama de la ciencia tan "joven" como la física del neutrino se da tiempo para que se arraiguen conceptos acostumbrados.

La cuestión sobre dos neutrinos se convirtió en actual solamente en el momento en que apareció la posibilidad real de resolverla por vía del experimento. La idea del experimento fue propuesta por el físico soviético B. M. Pontecorvo. Y el propio experimento lo realizaron brillantemente los colegas norteamericanos.

Los neutrones son una fuente muy cómoda de antineutrinos. Sin embargo, para conseguir

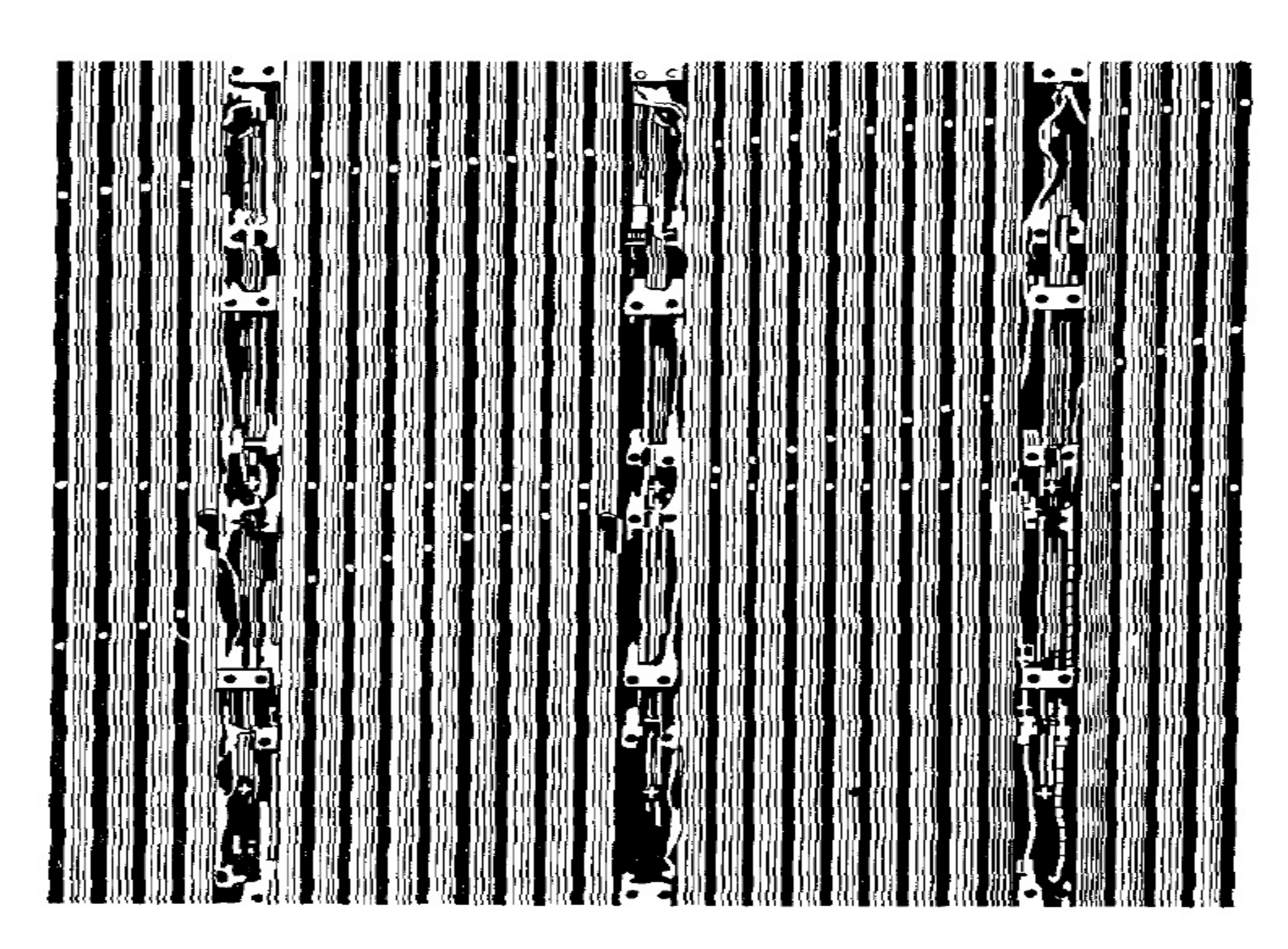
que estos últimos nazcan con energías grandes, es necesario, previamente, comunicar energía considerable también a los neutrones. Mas aceleradores para neutrones no existen. Estas partículas son neutras, y nosotros, hoy en día, sólo sabemos acelerar partículas cargadas.

No obstante, existe otro camino. Se conoce bien que durante la desintegración del mesón π se forman el mesón μ y el neutrino (o antineutrino). ¿Qué neutrino: "electrónico" o "μ-mesónico"? Hasta tiempos recientes una pregunta de este tipo ni siquiera se planteaba. Ahora, cuando ya está planteada, podemos contestar con precaución: en todo caso, "μ-mesónico", seguramente. Éste está vinculado estrechamente con el mesón μ ya por el "origen común". ¿Y si es simultáneamente "electrónico"? Es necesario un experimento...

El experimento realizado en 1962 en el acelerador de 30 mil millones electronvoltios, en Broorhaven, cuya preparación duró dos años se llevó a cabo de la siguiente manera. Un haz de protones acelerados fue lanzado contra el blanco de berilio engendrando flujos de mesones π. Estos últimos, desintegrándose a su vez, producían a la par de mesones aquello que fue de *máxima importancia:* antineutrinos (y neutrinos) de grandes energías. Es verdad que su número no era tan grande como en los experimentos con el reactor. Sin embargo, los cálculos demostraron que los antineutrinos rápidos con mucho mayor "gusto" entraban en interacción con otras partículas que los lentos*. Para registrar las partículas engendradas por los antineutrinos se utilizaba la llamada cámara de chispas. La misma incluía 10 toneladas de placas de aluminio

* Las palabras "rápidos" y "lentos" sólo designan la diferencia de energía.

entre las cuales se creaba una alta tensión. Si *una partícula cargada rápida* vuela a través de las placas, en los espacios que se encuentran en el trayecto que sigue se produce una descarga por chispas entre las placas. La huella ígnea bien discernible en las fotografías permite distinguir fácilmente los *mesones* μ de los *positrones* y electrones. Para que en la cámara, desde fuera, penetrasen sólo los neutrinos (y antineutrinos) se tenía una protección especialmente prevista.



Las observaciones duraron seis meses. En este período se *detectaron tan sólo cincuenta* casos (¡recuerden que las interacciones son débiles!) de nacimiento de partículas. ¡Y todas éstas, sin

excepción, resultaron ser mesones μ! ¡Ni un solo electrón o positrón! Fue una nueva y formidable sorpresa. Se demostró la existencia de dos diferentes tipos de neutrinos (y antineutrinos): del "electrónico" y del "μ-mesónico".

¿Qué tipos son éstos? ¿Cuál es la diferencia entre éstos? ¿Cuáles son los detalles de las leyes que los gobiernan? Por ahora no lo sabemos. Ante los científicos se planteó un nuevo enigma que aún está por adivinar.

En la cabeza del lector puede producirse la impresión de que el neutrino es una partícula rebelde y desagradecida. Por cierto, una sola vez sacó a los físicos del apuro, cuando salvó la ley de conservación de la energía, mas, posteriormente, tomó el desquite a su antojo, tramando a cada paso diferentes diabluras y echándoles a los científicos la zancadilla. Durante diez lustros se estudia el neutrino, y parece como si fuese necesario volver a comenzar todo desde el mismo principio.

Desde luego, no es del todo así. Por muy diestra que fuese esta partícula, no logró esconderse por completo. Ahora sabemos bastante sobre la misma y prevemos mucho.

Así, por ejemplo, estamos al corriente, en cierta medida, de las relaciones mutuas del neutrino con otras partículas, de las desintegraciones en que el neutrino participa y de las transformaciones que el mismo provoca.

La alquimia del neutrino

Aducimos, a título de ejemplo, alguna*s* desintegraciones donde el neutrino aparece en la primera generación (es que los productos de desintegración, de por sí, pueden ser inestables y, al desintegrarse, engendrar otros neutrinos).

$\mu^- \rightarrow e^- + \nu + \bar{\nu}$ es la desintegración del mesón μ

negativo en electrón, neutrino y antineutrino*.

$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu$ es la desintegración del mesón π positivo en mesón μ positivo y neutrino.

$$K^+ \rightarrow \mu^+ + \nu$$

o bien

$$K^+ \rightarrow \mu^+ + \nu + \pi^0 \quad \text{y} \quad K^+ \rightarrow e^+ + \nu + \pi^0.$$

Estos tres "canales de desintegración" del mesón K positivo son posibles porque el mesón K es una partícula relativamente pesada. Aquí la reserva de masa es suficiente para engendrar ni más ni menos que tres "fragmentos". En los casos en que el mesón π neutro no se forma, el exceso de energía se reparte entre el mesón μ (o el positrón) y el neutrino.

Finalmente, vamos a recordar, además, el ejemplo ya bien conocido de la desintegración β del neutrón en un protón, electrón y antineutrino.

Estas reacciones, al igual que cualesquiera otras desarrolladas entre las partículas elementales, tienen particularidades admirables. En primer término, los símbolos que designan las partículas se pueden "trasladar al otro lado de la flecha", reemplazando, sin embargo, en este caso las partículas por las antipartículas.

Además, se puede invertir la dirección de la flecha. Esto significa que cada reacción puede desarrollarse tanto en el sentido "directo", como en el "inverso".

Realicemos esta operación, por ejemplo, con la reacción de desintegración β del neutrón. Al principio, la escribimos en la forma

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}.$$

* Designemos las partículas con letras. El sentido de estas designaciones es fácil de comprender al echar una ojeada a la tabla de partículas elementales (págs. 372— 373).

Ahora traslademos el electrón a la izquierda e invertamos la dirección de la flecha. Se obtendrá una reacción que transcurre por el esquema:

$$n + e^{+} \leftarrow p + \overline{\nu}.$$

¡Pero sí ésta es nuestra vieja conocida: la misma reacción que dio la posibilidad, por primera vez, descubrir el antineutrino! En efecto, leída con palabras, suena así: el sistema constituido por un antineutrino y protón después de su colisión se transforma en un sistema de neutrón y positrón.

Un "juego de manos" análogo con los símbolos origina un método asombrosamente exitoso de predecir toda una cadena de reacciones con las partículas.

Retornemos una vez más al "problema de dos neutrinos". Analicemos la reacción de desintegración del mesón π, por ejemplo, positivo:

$$\pi^{+} \rightarrow \mu^{+} + \nu.$$

Hablando con rigor, ya no se permite escribir simplemente el símbolo "ν" para designar el neutrino. Por cuanto esta partícula aparece en la "compañía" con el mesón μ, es lógico denominarla "neutrino μ-mesónico", asignándole el símbolo ν_{μ}. Ahora recordemos nuestra regla. Ésta, de inmediato, da la posibilidad de escribir una reacción interesante:

$$\nu_{\mu} + \pi^{-} \rightarrow \mu^{-}.$$

Por consiguiente, durante la colisión con los mesones π negativos (y éstos siempre se hallarán en una cantidad suficiente en la "nube" mesónica que rodea cualesquiera de los protones y neutrones que entran en la composición de los núcleos atómicos) el "neutrino μ-mesónico" debe engendrar, precisamente, mesones μ, y no electrones.

Fueron estas consideraciones las que formaron la base de las elaboraciones teóricas de los experimentos para detectar los "dos neutrinos"

Sin embargo, semejante "juego de manos" con los símbolos tiene rigurosas restricciones cuyo sentido, por ahora, no entiende nadie.

Miren la tabla de partículas elementales insertada en las págs. 372—373. En ésta está presente un grupo de partículas ligeras, los leptones. En este grupo entran, precisamente, los dos neutrinos (el electrónico y el muónico), el electrón y el mesón μ^-, junto con las cuatro antipartículas correspondientes.

Resulta que en todas las reacciones conocidas entre las partículas, en todos los nacimientos y destrucciones de las mismas, se cumple de una forma absolutamente estricta la siguiente ley: *la diferencia entre los números de leptones y antileptones antes de la reacción es igual a la diferencia de estos números después de la reacción.*

Fíjense, por ejemplo, en la reacción de desintegración del neutrón. Antes de la reacción los leptones no estaban presentes. Después de la reacción aparece un leptón, el electrón, y un antileptón, el antineutrino. La diferencia entre el número de leptones y el de antileptones después de la reacción es igual a cero. Existe la ley de conservación del número de leptones análoga a la de conservación de las partículas pesadas, los bariones, y si estos números, a pesar de todo, pueden cambiar, la probabilidad de tales cambios es ínfima.

¿Por qué la diferencia entre el número de leptones y el de antileptones en el Universo queda invariable? ¿Y es que esto siempre es así? Aparecieron argumentos teóricos a favor de la posibilidad de infracción de esta regla. Tam-

bién se efectúan búsquedas experimentales*.

Es muy importante el hecho de que la ley de conservación de los leptones permita predecir de antemano y con plena seguridad qué reacciones entre las partículas no pueden desarrollarse.

Sería fatigoso y, además, no muy útil escribir escrupulosamente todas las reacciones con la participación de los neutrinos. Pero tampoco nos proponemos hacerlo. Es importante esclarecer otra cosa: ¿qué teníamos en cuenta, hablando con propiedad, al decir sobre el "carácter débil de la interacción"?

2. Constante de interacción y las transformaciones de las partículas elementales

Pensemos una vez más: ¿qué es la carga?

Ya nos hemos referido a aquella modificación que sufrió el concepto de "carga". Retornemos, entonces, a este tema una vez más para resumir todo aquello de que nos hemos enterado. Subrayemos: todo que vamos a exponer ahora representa la médula misma del concepto "carga", como lo entendemos ahora.

La carga eléctrica es el "patriarca" en su familia (si no hablamos de la carga gravitacional que ocupa un lugar algo especial). Su "infancia" está relacionada con la teoría clásica, no cuántica. Más aún, simplemente con la mecánica. Y la mecánica, como recordará el lector, se construye sobre la base de descripción recurriendo

---

* Hablando con propiedad, de la misma forma se presenta también el asunto con el número de partículas pesadas. Por qué y en qué medida se cumplen estas leyes no resulta más claro, ni mucho menos, que el cumplimiento de la ley de conservación de los leptones.

a la introducción de fuerzas. No es de extrañar, pues, que también la carga eléctrica, durante un largo período, se entendiera como medida de acción por medio de fuerzas de un punto material cargado sobre otro.

El concepto maxwelliano del electromagnetismo produjo pocos cambios en este aspecto. El hincapié fue hecho en el intermediario de las interacciones eléctricas y magnéticas, o sea, en el campo. En cuanto a la propia carga, ésta, como antes, conservó su función de medida de fuerza, la fuerza con que el campo actúa sobre los cuerpos. Por cierto, con ello sus funciones no se agotaban. Esta misma carga caracteriza, de acuerdo con Maxwell, también la medida de capacidad de los cuerpos para crear el propio campo.

Las ideas de la descripción cuántica aportaron nuevos detalles. Perdió su significación la característica mediante las "fuerzas". La interacción de los cuerpos eléctricamente cargados se presentó como resultado de intercambio de los cuantos del campo electromagnético: los fotones. Si no estuviéramos enterados de que en el interior de los electrones, digamos, no hay ningún "acopio de fotones", entonces, podríamos figurarnos que los cuantos electromagnéticos son capaces de "verterse" de las partículas o "echarse" en éstas, a semejanza de líquido que entra o sale a través de un orificio. En este caso, la carga parece como si determinase el ancho de estos orificios: cuanto más anchos son, tanto mayor es el flujo de cuantos. Pero, por supuesto, no existe "reserva" alguna de esta índole, y hablamos, meramente, de que la carga eléctrica determina el grado de intensidad de emisión (o de absorción) del fotón por las partículas cargadas o por sus grupos.

Aquí no se puede dejar de señalar una circunstancia que antes, en los capítulos anteriores,

quedó en la sombra (tal vez, debido a que allí el examen se realizara desde un punto de vista algo distinto).

Esta circunstancia consiste en lo siguiente. Al emitir o absorber el fotón, cualquier partícula: un electrón, protón, un mesón π o μ cargado, etc. —podemos enumerar todas las partículas de la tabla que poseen carga eléctrica— no experimenta ningunas transformaciones. Hablando más precisamente, casi ningunas, pues las propias partículas, en este caso, pierden o ganan energía. Pero esto atañe tan sólo a la variación del estado de movimiento.

De este modo, existe un amplio círculo de procesos en que la interacción con los fotones varía el estado de movimiento de las partículas sin originar sus transformaciones mutuas*. Precisamente esta circunstancia notabilísima "permite", en particular, a las interacciones electromagnéticas, en muchas ocasiones, manifestarse en atavío no cuántico. En cambio, las interacciones nucleares ya no poseen esta propiedad o, puede ser, sólo conservan cierto dejo insignificante de la misma.

Durante las interacciones cuánticas también se lleva a cabo el intercambio de cuantos, pero no de fotones, sino de mesones. Una vez más se puede hablar de la carga, en este caso, de la carga nuclear en tanto criterio de intensidad de emisión por los protones y neutrones de los cuantos de los campos mesónicos que transfieren las interacciones.

Sin embargo, aquí existen diferencias esencia-

* He aquí algunos ejemplos de los procesos en los cuales las interacciones electromagnéticas están relacionadas con las transformaciones de las partículas: el nacimiento y aniquilación de los pares electrón—positrón, desintegraciones del mesón π^0 neutro y del hiperón Σ^0 neutro.

les. En algunos aspectos tan esenciales que esta circunstancia dio lugar, incluso, a la variación de la terminología.

La carga como constante de interacción

La primera diferencia consiste en lo siguiente. Al irradiar mesones cargados tiene lugar la transformación de las partículas fuentes. Es un fenómeno completamente nuevo en comparación con la interacción electromagnética.

Podemos decir que los procesos de la interacción nuclear (o, hablando de otra forma, de la interacción fuerte) vienen acompañados, en general, de transformación mutua de las partículas. La única excepción es el caso en que como emitido o absorbido interviene el mesón neutro. En todos los demás casos las interacciones nucleares están relacionadas no solamente con la variación del estado de movimiento, sino también con la de la clase de partículas.

Tomada bajo este enfoque, la carga nuclear interviene como criterio cuantitativo de cuán frecuentemente y con qué intensidad se desarrollan estas transformaciones recíprocas, estas transmutaciones.

Aquí, sin embargo, el aspecto del problema destacado por nosotros no se manifiesta aún de forma muy patente. Eso se debe a que entre el protón y el neutrón hay demasiado parecido. Si de pronto se "desconectasen" las interacciones electromagnéticas, estas dos partículas, en general, resultarían imposibles de distinguir. Por esta razón, se dice con frecuencia que no son partículas diferentes, sino "estados de carga" de una misma partícula. Pero las interacciones fuertes son típicas no sólo para los nucleones, únicamente. Son susceptibles de entrar en interacción fuerte también los hiperones (partí-

culas más pesadas que el neutrón y el protón y designados como partículas Λ, Σ y Ξ), así como los mesones K. En este caso ya se manifiesta con plena nitidez aquel rasgo de las interacciones fuertes que demuestra que éstas están relacionadas con las transformaciones de unas partículas en otras.

Finalmente, examinemos las interacciones débiles. Éstas, raras veces, se asocian entre los físicos con la idea de algo que, aunque de forma distante, hace recordar las acciones de fuerza. Por regla general, también la "carga" se denomina aquí simplemente "constante de interacciones débiles", como si se quisiera subrayar que, por su sentido, esta carga está muy lejos de su análogo clásico.

Por lo demás, del mismo modo, en vez de la carga eléctrica se puede hablar sobre la constante de interacciones electromagnéticas. En el caso de las fuerzas nucleares los físicos ya hace mucho prefieren hablar de la constante de interacciones fuertes, y no de la carga nuclear o mesónica.

La constante de interacción débil, con derecho, se encuentra en una "fila" con las magnitudes que en la teoría cuántica caracterizan otras interacciones. Es que en esta teoría *cualquier constante de interacción* (tenemos que comenzar a acostumbrarnos a este término que sustituye el de "carga") *determina cuán rápidamente transcurren las transformaciones de unas partículas en otras.* La constante de interacciones electromagnéticas lo hace para las transformaciones de cualesquiera partículas cargadas en las mismas partículas (pero con la variación del estado de movimiento) más el fotón. La constante de interacciones nucleares, para las transformaciones mutuas de los bariones con la participación de los mesones π, K y otros. Por fin, la "carga débil", la constante de interacciones débiles,

similarmente a las magnitudes anteriores, describe la intensidad de desarrollo de las transformaciones con la participación del neutrino (y antineutrino). Más tarde veremos que su papel no se agota con ello, pero no es conveniente adelantarnos.

Leyes de conservación de las cargas bariónica y leptónica

Ahora conviene decir varias palabras acerca de otra diferencia entre la carga eléctrica y todas las demás, diferencia que, en lo fundamental, llevó, precisamente, a que en la actualidad las fuerzas se caracterizan por las constantes de interacciones, y no por cargas. (A propósito, el lector se habrá fijado ya que la sustitución de la corta palabra "carga" por la larga expresión "constante de interacción" provoca, sin mencionar otros inconvenientes, dificultades puramente estilísticas durante su frecuente empleo.)

El término "carga" no fue expulsado del campo de las interacciones fuertes y débiles, sino sólo dejó de caracterizarlas cuantitativamente, convirtiéndose en un número cuántico que se conserva. He aquí la causa de este proceder. Hasta el momento no prestamos atención a que la carga eléctrica tiene dos aspectos. Por un lado, caracteriza la intensidad de las interacciones electromagnéticas, y por otro, es una magnitud que se conserva. Como recordará el lector, la suma algebraica de las cargas eléctricas en un sistema cerrado queda invariable.

Estas dos funciones de la carga no guardan relación orgánica. No existe una ley de la naturaleza tal que exija la conservación de las constantes de interacción para cualesquiera fuerzas.

Para las fuerzas electromagnéticas esto es así,

mas para las nucleares y fuertes la cosa es distinta. En las interacciones fuertes y débiles las funciones de la carga —fusionadas en la electrodinámica en una sola se desdoblan. Aparecen dos magnitudes independientes. Una de éstas caracteriza la intensidad de las interacciones, y la otra, la conservación del número de partículas: bariones o leptones. Era lógico conservar el término de "carga" para una de estas magnitudes, con el fin de evitar una confusión. Se procedió precisamente de esta forma. El término de "carga" empezó a aplicarse a los números cuánticos que se conservan, y no a las características de las interacciones. Por supuesto, también se habría podido obrar de otro modo.

Primeramente, recordemos qué se denomina ahora carga bariónica. Otra vez admitamos que el número de partículas pesadas, los bariones, se conserva. O, más exactamente, queda constante la diferencia entre el número de bariones y el de antibariones, al igual que queda invariable la diferencia entre el número de partículas cargadas positiva y negativamente.

Este hecho empírico puede exponerse de la siguiente manera. *Introducir un nuevo número cuántico que para todos los bariones toma el valor de +1 y para todos los antibariones el de —1 y dar a este número el nombre de carga bariónica. En este caso, la conservación del número de bariones es la conservación de la suma algebraica de las cargas bariónicas.* Así, pues, los bariones adquirieron una nueva característica: la carga bariónica, con la particularidad de que esta nueva característica no guarda relación con la constante de interacciones fuertes, la cual no se conserva.

Por ejemplo, la constante de interacciones fuertes del protón y del antiprotón es una misma, y no solamente por su magnitud, sino también

por el signo. Por esta causa, durante la aniquilación del par protón—antiprotón sus constantes de interacción meramente desaparecen. Al mismo tiempo, la suma algebraica de las cargas eléctricas no varía, puesto que el protón y el antiprotón tienen signos diferentes de la constante de interacciones electromagnéticas, o sea, de la carga eléctrica.

La correlación entre la carga bariónica y la constante de interacciones fuertes sólo consiste en que todas las partículas que poseen carga bariónica entran en interacción fuerte. Los electrones y otros leptones carecen de ésta. Tampoco tienen carga bariónica los transportadores de las interacciones nucleares, los mesones π y K, a semejanza de cómo el fotón carece de carga eléctrica.

En el mundo de los cuerpos grandes, en el macromundo, no hay ninguna ley de conservación que recuerde, aunque sea muy lejanamente, la ley de conservación de la carga bariónica. En el caso de existir una ley semejante, esta circunstancia daría lugar a situaciones más asombrosas. Figúrense por un instante que existiría la ley de conservación de los individuos humanos. Siendo así, los hombres y las mujeres nacerían sólo por parejas y, en lo sucesivo, podrían vivir un tiempo ilimitadamente largo. Mas, a primer intento de formar familia, desaparecerían inmediatamente (por lo menos, para la sociedad.)

Precisamente tal es la situación de las cosas en el mundo de las partículas pesadas. De modo análogo se desarrollan los asuntos cuando se trata de los leptones los cuales todos, sin excepción, toman parte en las interacciones débiles.

Como ya hemos señalado, se conserva la diferencia entre el número de leptones y antileptones, con la particularidad de que la conser-

vación del número de leptones (nos expresaremos así para mayor brevedad) no tiene relación a la constante de interacciones débiles.

La ley de conservación del número de leptones se puede formular cuantitativamente de una forma sencilla, si a todos los leptones se atribuye la carga leptónica igual a +1 y, luego, a los antileptones, la carga igual a —1. *Entonces, la suma algebraica de las cargas leptónicas debe quedar invariable.*

Con el descubrimiento de dos tipos de neutrinos la ley de conservación del número de leptones se complicó. Ahora, para describir las posibles transformaciones con los leptones es necesario introducir dos diferentes cargas leptónicas. Al electrón y al neutrino electrónico se debe atribuir la carga leptónica electrónica, y al mesón μ y al neutrino muónico, la carga leptónica μ-mesónica (aquí la terminología todavía no está establecida por completo, por cuyo motivo es necesario utilizar denominaciones tan complejas), con la particularidad de que estas dos cargas se conservan independientemente una de la otra. La suma algebraica de unas y de otras cargas no varía, cualesquiera que sean las reacciones entre las partículas.

Es probable que la carga eléctrica resulte capaz de reunir simultáneamente las funciones de la constante de interacción y del número cuántico que se conserva debido a que la constante de interacciones electromagnéticas puede tener diferentes signos: a la par de la atracción existe también la repulsión. Las interacciones fuertes y débiles están exentas de esta cualidad y, por tanto, aquí es imposible semejante combinación de las funciones. Por lo demás, en todo ello hasta la fecha no existe total claridad.

Una deducción, posiblemente la más importante en el libro

Ahora, después de la digresión al campo de nuevas leyes de conservación, conviene hacer cierto balance de aquello que sabemos sobre las interacciones. Cualquier constante de interacción caracteriza cuán activamente transcurren las transformaciones en determinados grupos de procesos similares. (En esencia, la palabra "similar" denota, con frecuencia, tan sólo el hecho de que en la clase dada de transformaciones se puede pasar con la misma constante de interacción.)

Hoy en día existen no más que cuatro semejantes constantes, si se cuenta junto con la gravitacional. Nada más que cuatro. ¡Y toda la infinita diversidad de los acontecimientos en el mundo que nos rodea se reduce precisamente a estas constantes!

Una de las tareas importantísimas de la física es la medición exacta, en el grado de lo posible, de las diferentes constantes de interacción. Y la realización de esta tarea dista mucho de ser siempre sencilla. Pasaron los tiempos no sólo de Coulomb, sino también de Millikan.

Resulta más patente comparar no las constantes, sino las energías de las diferentes interacciones de las partículas (para distancias determinadas entre éstas). Si, convencionalmente, se toma por unidad la energía de la interacción nuclear (mesónica), entonces, las interacciones electromagnéticas constituirán 10^{-2}, y las débiles 10^{-14} de esta magnitud.

En este caso ya es difícil poner en duda lo lícito de la denominación "débiles" para las interacciones del último tipo.

No obstante, al mismo tiempo, en este caso, al igual que en otros muchos, no se puede olvidar

que lo “débil” no es, ni mucho menos, sinónimo de “insignificante”.

Las fuerzas en la naturaleza y las leyes de conservación

Si se abstrae de la transmutación hipotética de los gravitones, se puede afirmar que las transformaciones de las partículas elementales unas en otras se provocan por tres tipos de fuerzas. La cuestión fundamental, la cuestión de las cuestiones es: *¿cuáles transformaciones de las partículas son posibles*? La respuesta a esta cuestión es inesperadamente simple. Las interacciones electromagnéticas fuertes y las interacciones débiles están prestas para provocar cualesquiera transformaciones de cualesquiera cosas en otras cualesquiera, y el relativo orden, la relativa estabilidad existen en el mundo únicamente porque actúan restricciones poderosas. ¡Son las leyes de conservación! Todo lo que puede suceder sin infringir las leyes de conservación, se opera, en realidad, por acción de tres fuerzas.

Según la expresión de Kenneth Ford, en el mundo reina la plena democracia. Las partículas pueden comportarse, dentro de los marcos de la ley, como les de la gana. Si antes se pensaba que las leyes fundamentales determinan lo que puede (y debe) suceder, ahora es necesario considerar como primordiales las leyes que establecen aquello que no puede suceder. Las leyes de conservación son precisamente estas leyes. Prohíben, absolutamente, los procesos en que las magnitudes obligadas a conservarse no quedan constantes.

En fin de cuentas, este cambio de las concepciones acerca de las leyes fundamentales de la naturaleza viene determinado, simplemente, por

el carácter probabilístico de las leyes cuánticas del movimiento y de las transformaciones de las partículas elementales.

Precisamente el carácter probabilístico de las leyes no permite afirmar con certeza qué tendrá lugar al chocar dos partículas. Así, por ejemplo, durante la colisión de un protón rápido con un neutrón pueden aparecer las más diversas partículas. Pueden engendrarse tres mesones π y un par de mesones K. Con el mismo éxito puede haber cinco mesones π, etc. En una gran serie de experimentos idénticos se realizan todas las posibilidades. Las probabilidades de los resultados finales de la colisión son diferentes, pero todas ellas no son iguales a cero, si no contradicen las leyes de conservación. Por esta causa, *siempre se puede decir lo que no sucederá*, pero nunca se puede afirmar de antemano qué se obtendrá al final de la reacción.

En qué descansa nuestro mundo

Con frecuencia, al entablar el primer conocimiento con el mundo de las partículas elementales, uno se asombra por qué la mayoría de las partículas es inestable. Pero, en la realidad, no es este fenómeno el que debe asombrar. Las transformaciones mutuas es el modo de vida de las partículas elementales.

Por acción de tres tipos de fuerzas nunca cesan las transformaciones breves de partículas unas en otras. Si no hay impedimentos por parte de la ley de conservación de la energía (otras leyes de conservación se cumplen también para tales procesos), tarde o temprano tendrá lugar una transformación real: una partícula pesada se desintegra en más ligeras.

En este caso, no hay nada que prohíba el proceso inverso. Al encontrarse juntas, las par-

tículas descendientes (partículas-hijos) se fusionan, transformándose en partícula-padre. Sin embargo, este encuentro es muy poco probable. Las partículas se dispersan volando desde el lugar de su nacimiento, y por cuanto nuestro mundo no está poblado muy densamente de ellas, por regla general les falta tiempo para entrevistarse con sus hermanos y hermanas. Se desintegrarán antes, a menos que no sean estables. Todos los procesos del micromundo, en particular, las transformaciones de las partículas, son reversibles, sin embargo, en las condiciones ordinarias, el proceso inverso a la desintegración es poco probable. Solamente con estados superdensos de la materia, en las profundidades de las estrellas pesadas, los procesos inversos se desarrollan, por lo visto, con la misma frecuencia que los directos.

Por este motivo es de esperar que la partícula nacida no pueda existir durante largo plazo. Así, precisamente, sucede en la realidad, con algunas excepciones. Estas excepciones son cinco, si excluimos las antipartículas: el fotón, dos tipos de neutrinos, el electrón y el protón. Lo que nos debe dejar asombrados es, precisamente, lo que, a pesar de todo, partículas estables sí existan.

El que el fotón y los neutrinos son estables no es difícil comprender. Éstos son más que ligeros. Su masa en reposo ya es igual a cero, y no son susceptibles de desintegrarse en partículas más ligeras. Todas las otras partículas, al parecer, deberían desintegrarse en fotones y neutrinos. Esto no contradice la ley de conservación de la energía.

Sin embargo, dos partículas —el electrón y el protón— evitan la autodestrucción. ¿Por qué? Tan sólo gracias a leyes de conservación especiales.

No sabemos, como es debido, por qué la carga eléctrica se conserva en la naturaleza. Pero por cuanto sabemos que se conserva, podemos comprender la causa de la estabilidad de los electrones. *El electrón es la más ligera entre las partículas cargadas y por esta razón no puede desintegrarse*. Las partículas más ligeras: el fotón y el neutrino, no están cargadas. Como resultado, la desintegración del electrón conduciría inminentemente a la infracción de la ley de conservación de la carga. La garantía de la estabilidad del electrón es, probablemente, el mayor mérito de esta ley de conservación. El protón no se descompone, a pesar de un exceso muy grande de energía en reposo, en comparación con las partículas ligeras, y las más diversas posibilidades de desintegrarse en mesones y leptones, solamente porque es el *más ligero de los bariones*. La estabilidad de los núcleos y, por consiguiente, de todo el Universo descansa en la ley de conservación del número de bariones. Esta ley es un poderoso freno para prevenir la desintegración del protón en otras partículas.

Da miedo pensar que hubiera sido sin las leyes de conservación de las cargas eléctrica y bariónica*. El mundo se convertiría en una triste aglomeración de fotones y neutrinos los cuales, solamente raras veces, darían a luz estructuras efímeras que, de inmediato, regresarían a su nirvana fotónico-neutrínica. En un lapso de 10^{-10} segundos ni siquiera la poderosa naturaleza hubiera sido capaz de crear seres tan racionales como lo somos nosotros.

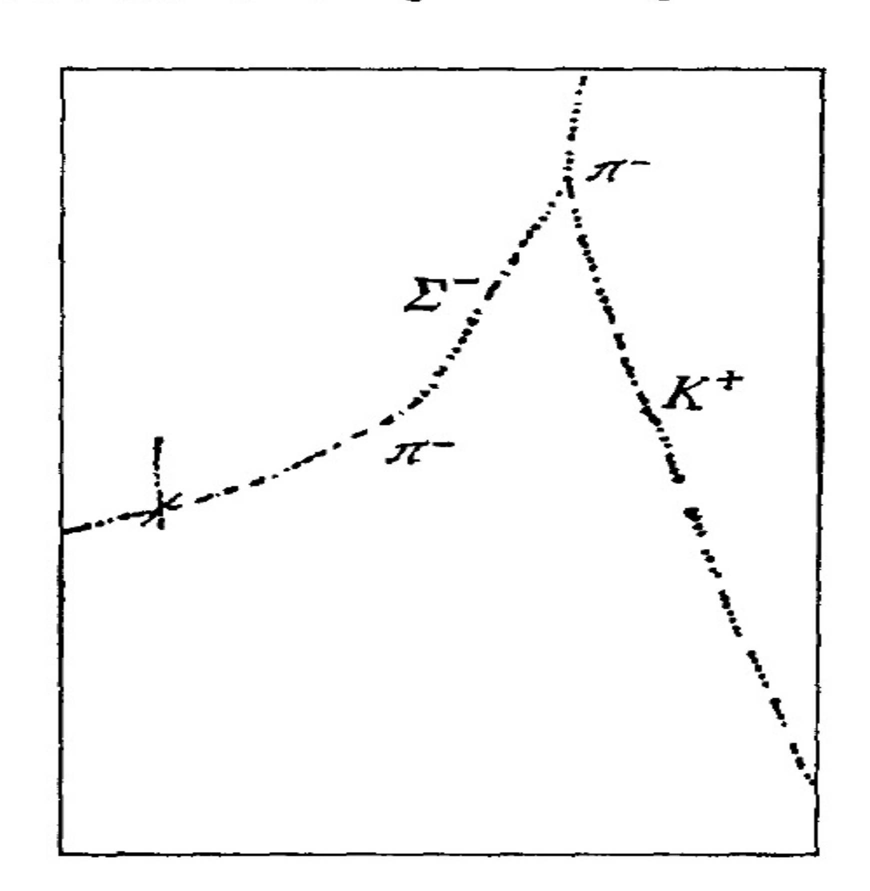
Se conservan no sólo las cargas eléctrica, bariónica y leptónica. También existen otros números cuánticos los cuales, igualmente, se

* Por lo demás, los físicos no se dejaron atemorizar, y ahora se hacen intentos de medir experimentalmente el tiempo de vida del protón.

conservan, pero ya no siempre. El lector los conocerá más tarde.

Hace su aparición en la física la extrañeza

En el resumen popular dedicado a la situación en la física de las partículas elementales hecho por Gell-Mann y Rosenbaum en 1957, se tomaron como epígrafo las palabras de Francis Bacon: "No existe hermosura perfecta que no contenga en sí cierta porción de extrañeza". Cuando se entra en contacto íntimo con las ideas de la física moderna no se puede dejar de sentir, a



pesar de todo lo demás, su perfección estética. (A Pablo Dirac, uno de los más destacados teóricos modernos, pertenecen las palabras no exen-

tos, en modo alguno, de profundidad: "Una teoría física debe ser elegante desde el punto de vista matemático".) Al mismo tiempo es inherente a esta teoría un matiz absolutamente indiscutible de "extrañeza". Y hasta la propia palabra "extrañeza" entró en el léxico científico. Se sobreentiende que aquí no se trata solamente de la alacridad y el sentido humorístico de los teóricos, entonces jóvenes, que la pusieron en circulación. La naturaleza, en efecto, parece como si hubiese dado una lección a los físicos que, en cierto grado, se tranquilizaron, deparándoles, con una generosidad magnificente, una sorpresa tras otra.

Empezando desde el año 1947 en la tabla de partículas elementales apareció toda una pléyade de hiperones y mesones K. Aparecieron inesperadamente, como caídos del cielo. Su existencia no derivaba de ninguna teoría. Eran "partículas extrañas". Y recibieron precisamente este nombre. Y las partículas parecía como si se hubiesen apresurado a justificar esta denominación.

Por sí fuese insuficiente que se presentaran inesperadas, el propio acto de su aparición transcurría de modo incomprensiblemente insólito. Estas partículas nunca nacen solitarias, siempre lo hacen por parejas o en una cantidad todavía mayor. Parece que en ello no hay nada asombroso. Ya sabemos muchos ejemplos de nacimiento de parejas: por pares se engendran el electrón y el positrón durante la colisión entre el cuanto γ y el núcleo; por pares nacen también otras partículas junto con sus correspondientes antipartículas. Pero el quid de la cuestión consiste precisamente en que las parejas de las partículas extrañas son, por completo, de otra índole. En este caso, no tenemos que ver con el grupo partícula—antipartícula. He aquí por

ejemplo, el esquema de la reacción

$$\pi^- + p \rightarrow \Sigma^- + K^+.$$

El mesón π negativo, al chocar con el protón, engendra el hiperón Σ negativo y el mesón K positivo; seguidamente, Σ^- se desintegra en mesón π y neutrón que no deja huella en la cámara. Σ^- y K^+, en general, no están ligados por la relación partícula—antipartícula. También en otras reacciones de formación de las partículas extrañas la situación es análoga. ¿Cuál es la causa de ello? La respuesta a este interrogante se debía buscar en algún lugar fuera de los límites de la teoría existente en aquel período.

Sin embargo, el asunto no se limitaba a los asombrosos caprichos de los procesos de nacimiento. Las desintegraciones de las nuevas partículas eran todavía más "extrañas".

Analicemos una vez más la reacción que acabamos de escribir. En ésta participan el protón y el mesón π, o sea, partículas de interacción explícitamente fuerte. En consecuencia, también otras dos partículas, tanto el hiperón Σ, como el mesón K, igualmente se deben referir al orden de participantes en las interacciones fuertes.

En efecto, esta tesis se confirma por toda una serie de argumentos tanto teóricos, como experimentales directos: por ejemplo, los hiperones podrían, excelentemente, sustituir en el núcleo los nucleones si no fuesen tan inestables (ya nos hemos referido a ello, al hablar sobre los hipernúcleos).

Así, pues, los hiperones (para mayor brevedad hablaremos sobre éstos) son partículas de interacción fuerte. Este hecho corresponde también plenamente a que los mismos nacen con gran "actividad". Siendo así, deberían de muy "buen grado" expulsar mesones π, transformándose en este caso en nucleones, digamos, de acuerdo con

el esquema

$$\Lambda^0 \rightarrow p + \pi^-,$$

lo que, a propósito, se observa realmente.

Pero he aquí una cosa sorprendente. Este proceso es radicalmente inhibido por algo. Y no sólo dicho proceso. Por cuanto los hiperones son partículas de interacción fuerte, a todos ellos, al parecer, "conviene" desintegrarse inmediatamente después de haber nacido. Para realizar este acto se requerería, aproximadamente, el mismo intervalo de tiempo que necesita un rayo de luz para recorrer la distancia igual a las dimensiones de una partícula (mientras tanto, a la luz le es suficiente una décima de segundo para dar una vuelta alrededor del globo terráqueo por el ecuador). ¿Y qué dice la experiencia? La experiencia dice que los hiperones viven decenas de miles millones más que "conviene" a las partículas de interacción fuerte. ¿Es extraño? No hay duda alguna, pero las partículas también son "extrañas".

Sin embargo, lo expuesto no agota todas las rarezas. Si se calcula la "carga" responsable por la desintegración de los hiperones, se obtendrá algo totalmente sorprendente (aunque, después de todo lo dicho no lo resulta ser hasta tal punto): en lugar de la constante de interacción fuerte se obtendrá (y, además, con una exactitud sumamente convincente) —¿qué pensará usted sobre el particular?— ¡Se obtendrá la *constante de interacción débil*!

Volvamos a citar el resumen de Gell-Mann y Rosenbaum: "...fugándose en distintas direcciones unas de otras inmediatamente después de su nacimiento, las partículas extrañas evitan su perecimiento por la interacción fuerte, y viven hasta el momento en que el proceso débil, mucho menos probable, acabe con ellas".

El "secreto de la longevidad" de las partículas extrañas

Así, pues, fuera de cualquier duda, existen ciertas circunstancias que impiden la desintegración "fuerte" de las partículas extrañas. ¿Qué circunstancias son éstas? La larga experiencia acostumbró a los físicos al pensamiento de que detrás de cualquier "prohibición" conviene buscar algunas leyes de conservación. No pueden transcurrir transformaciones en las cuales se infringiese la ley de conservación de la carga. La ley de conservación de la energía "prohíbe" los procesos en que la masa total de los productos de desintegración es mayor que la de la partícula que se desintegra. Las leyes de conservación de la energía y el impulso implican que durante la aniquilación del par electrón—positrón se engendran no menos que dos cuantos γ.

¿Es posible, acaso, que la "inhibición" de la desintegración fuerte de los hiperones signifique que aquí se manifiesta cierta nueva ley de conservación todavía no advertida por los físicos? Esta hipótesis la sugirió Gell-Mann. La nueva magnitud que se conserva durante las interacciones fuertes y electromagnéticas recibió el nombre de "extrañeza".

A las partículas "ordinarias", es decir, al protón, neutrón (y sus antipartículas), así como a los mesones π cargados y neutro se atribuyó la extrañeza cero. Para las demás partículas de interacción fuerte la extrañeza se distribuía de la siguiente forma:

extrañeza igual a —1:

$$\Lambda^0,\ \Sigma^+,\ \Sigma^-,\ \Sigma^0,\ K^-,\ \widetilde{K}^0;$$

extrañeza igual a +1:

$$\widetilde{\Lambda}^0,\ \widetilde{\Sigma}^+\ ,\widetilde{\Sigma}^-,\ \widetilde{\Sigma}^0,\ K^+,\ K^0$$

(es decir, para las antipartículas correspondientes);

extrañeza igual a —2:

$$\Xi^-,\ \Xi^0;$$

extrañeza igual a +2:

$$\Xi^-,\ \widetilde{\Xi}^0.$$

Si la reacción es tal que la extrañeza no varía, el proceso se desarrolla por el canal fuerte. Así, en el ejemplo ya citado,

$$p+\pi^- \rightarrow \Sigma^- + K^+$$

las partículas iniciales tienen la extrañeza cero; la extrañeza de Σ^- es igual a —1 y la de K^+ es igual a +1. Por consiguiente, también en el "segundo miembro" la extrañeza total es igual a cero. El canal "fuerte" resulta permitido.

Por otra parte, la desintegración

$$\Lambda^0 \rightarrow p + \pi^-$$

transcurre con la evidente variación de la extrañeza en una unidad (a partir de —1 se obtiene 0). De conformidad con la nueva ley de conservación, semejante transformación no puede desarrollarse siguiendo las leyes de la interacción fuerte. El nacimiento por parejas viene determinado, precisamente, por la conservación de la extrañeza. Análogamente a como las reglas existentes en el alpinismo soviético prohíben las ascensiones solitarias (emprender la subida a una cumbre sólo pueden no menos que dos personas), la ley de conservación de la extrañeza deja salir a la vida los hiperones y los mesones K únicamente por parejas. De no existir esta ley, las partículas sucumbirían inmediatamente después de su nacimiento, lo que no siempre ocurre con los alpinistas solitarios.

Para introducir mayor evidencia en aquello

de que hemos hablado aquí, figúrense que cierto proceso que se desarrolla por el "canal fuerte" (es decir, sin la variación de la extrañeza) dura un segundo. En este caso, para las transformaciones acompañadas de variación de la extrañeza en una unidad ¡se requererían decenas de miles de años! Y para los casos en que la extrañeza varía en dos unidades, se necesitarían plazos inconcebiblemente grandes, sumamente superiores a la edad de la propia Tierra.

Qué interacciones se denominan débiles

Si ahora se le pregunta al lector: "¿Qué interacciones, en fin de cuentas se denominan débiles?" — es poco probable que sea capaz de contestar con claridad. Pero la culpa de ello la tienen, principalmente, los autores, y no el lector. Nuestro relato sobre las interacciones débiles de ningún modo se puede llamar consecutivo.

Por lo demás, ni siquiera nos afanamos por ser consecutivos. Al principio, quisiéramos darles una noción, aunque sea parcial, acerca de aquel torrente algo caótico de ideas y hechos que tenía lugar en la realidad durante la investigación de las interacciones débiles.

Ahora nuestras ideas acerca de estas interacciones experimentaron muy grandes variaciones. De hecho, fue construida una nueva teoría en la cual las interacciones débiles se unificaron, con sumo éxito, con las electromagnéticas. Pero hablaremos sobre el particular más adelante. Mientras tanto, ateniéndonos al curso histórico del desarrollo de la teoría de las interacciones débiles no se puede dejar de mencionar el largo período cuando esta teoría estaba muy lejos de alcanzar el grado de perfección tan alto como la electrodinámica cuántica. Claro que hubo

éxitos e, incluso, considerables, mas quedaban todavía muchas cosas enigmáticas. ¿Qué se esclareció, entonces, si íbamos a hablar consecutivamente en la medida de lo posible?

Si la vida, en general, y la lectura de este libro, en particular, no enervaron todavía la maravillosa capacidad de asombrarse, entonces, ya el primer hecho, nos puede dejar perplejos.

Figúrense que usted vio en una pradera una flor insólita perdida entre la alta y frondosa hierba. Usted jamás en su vida ha visto flores semejantes y está seguro que es la única, como la florecita escarlata del cuento de hadas. Y de pronto le dicen que estas flores se pueden encontrar por doquier. Sólo que las oculta esta alta y frondosa hierba. Y no es necesario emprender un viaje a la morada del "monstruo deforme" para arrancar la florecita escarlata.

Las interacciones débiles se nos presentan exóticas: el enigmático neutrino, la desintegración de las partículas extrañas, he aquí las huellas de su actividad. Pero, en la realidad, no es así. Las interacciones débiles de ningún modo son exóticas. Actualmente, los científicos consideran que estas interacciones *son inherentes a todas las partículas elementales*.

El quid de la cuestión radica en que en los procesos que transcurren a costa de la acción de las fuerzas electromagnéticas o nucleares, las interacciones débiles no se manifiestan de una forma notable, permaneciendo en la sombra, precisamente debido al hecho de que son débiles*. Simplemente, se pueden despreciar, pues no dudamos en prescindir de las fuerzas gravitacionales en todo lo que atañe a las partículas elementales. Sólo en los casos en que las fuerzas

* Por lo menos, para las energías con los cuales deben tratar los experimentadores contemporáneos.

electromagnéticas o nucleares son impotentes de hacer algo, se promueven al primer plano las interacciones débiles. Únicamente en estos casos el ser macroscópico tan poco delicado como es el hombre es capaz de advertir su acción. En la realidad, las interacciones débiles, en cuanto a su universalidad, son inferiores, posiblemente, tan sólo a las fuerzas gravitacionales.

Al principio de este capítulo se habló mucho sobre el neutrino. La causa de ello reside en que (si el lector no la ha captado todavía) el neutrino es la única partícula que no experimenta ningunas interacciones, a excepción de la débil, si no nos referimos a las fuerzas gravitacionales aún más débiles.

Todos los procesos en que aparece (o desaparece) el neutrino vienen condicionados por las interacciones débiles. Precisamente por esta razón el estudio de los procesos con el neutrino del mejor modo arroja luz sobre la naturaleza de las fuerzas débiles.

Existe un solo grupo más de procesos en los cuales las interacciones débiles intervienen como decisivas. Éstos son procesos de transformación de las partículas con la variación de la extrañeza. La conservación de la extrañeza en las interacciones electromagnéticas y fuertes abre el terreno para las fuerzas débiles durante cuya acción, debido a motivos misteriosos, la extrañeza no se conserva.

De este modo, entre las interacciones débiles se incluyen, habitualmente, todos los procesos con la participación de los neutrinos y todas las interacciones que cambian el número cuántico — la extrañeza.

Carácter universal de las interacciones débiles

La carga eléctrica determina la velocidad de transformación de una partícula cargada en la misma partícula más el fotón*; la constante de interacciones fuertes, las transformaciones de los bariones unos en otros con emisión de los mesones. Mientras tanto, la constante de interacciones débiles es responsable por las más diversas transformaciones de las partículas, tanto con la participación del neutrino, como sin éste; tanto con los leptones, como con los bariones. ¿Dónde, pues, está el origen de esta universalidad?

Si uno reflexiona bien, le puede parecer que los intentos de explicar con una sola causa una multitud de las más diversas transformaciones de las partículas elementales son tan poco prometedores, como los de explicar con una causa única, extinción de los saurios prehistóricos y la aparición en el globo terráqueo de ballenas y cachalotes.

Sin embargo, no es así. Se enunció una hipótesis que explicaba la naturaleza de las interacciones débiles universales.

De acuerdo con esta hipótesis, en las interacciones débiles siempre toman parte cuatro partículas que tienen el espín igual a $\frac{\hbar}{2}$. Son cuatro fermiones; así, con frecuencia, se denominan las partículas cuyo espín es igual a la mitad de la constante de Planck. *La universalidad de las interacciones débiles consiste en que la interacción de dos pares de fermiones está estructurada de una misma manera y se caracteriza por una misma constante de enlace.* Los pares de fermiones que entran en interacción pueden ser los más dife-

* Salvo la excepción mencionada antes: las desintegraciones del mesón π^0 y del hiperón Σ^0.

rentes. Sólo se necesita que cada par contenga una partícula cargada y una neutra. Los leptones se agrupan en sus parejas: electrón—neutrino electrónico; mesón μ—neutrino muónico; los bariones, en las suyas. Pero cualesquiera que sean estas parejas, la interacción débil de éstas siempre es la misma.

En el mundo de seres vivientes a esta situación correspondería un cuadro de lo más fantástico. La ley de transformación de la pareja conyugal de los Ivanov en la misma pareja, pero con una nueva condición, sería idéntica a la ley de transformación del elefante y equidna en canguro y tortuga.

Aquí, naturalmente, el lector debe alzar una voz de protesta. "El parecido entre las transformaciones de las partículas elementales y la transmutación del elefante en canguro resulta exagerado adrede. Pero, ¿dónde se puede ver la explicación de la universalidad de las interacciones débiles si se toma en consideración la posibilidad de semejantes paralelos? Es que aquí, en la realidad, se trata de cómo, en los marcos de la teoría, relacionar los hechos inusitados y no del modo de explicarlos".

Contestar a lo dicho se puede, aproximadamente, así. Desde luego, el asunto, en grado considerable, va precisamente de este modo. La tarea de los físicos consiste, en primer lugar, en advertir lo común que se oculta tras el abismo de los hechos dispersos. En descubrir (o adivinar) una ley general. ¿Y por qué en la naturaleza actúa esta ley general? Aquí, una vez más, al igual que en otras ocasiones anteriores a ésta, no estamos en condiciones de decir nada. Por lo menos, en la actualidad.

Sólo no se debe pensar que fue fácil adivinar el carácter cuadrifermiónico de las interacciones débiles. ¡De ningún modo! En el caso, digamos

de desintegración del neutrón y del mesón μ esto es evidente, de modo directo:

$$n \rightarrow p + e^- + \overline{\nu}_e,$$

$$\mu^- \rightarrow e^- + \overline{\nu}_e + \nu_\mu.$$

Aquí están presentes todos los cuatro fermiones en interacción.

Y ahora fíjense en las desintegraciones del mesón π y del hiperón Λ^0 también debidas a las interacciones débiles:

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu,$$

$$\Lambda^0 \rightarrow p + \pi^-.$$

Aquí, directamente, participan tan sólo de a dos fermiones. Sin embargo, también las reacciones dadas son originadas por la interacción débil cuadrifermiónica, pero todo se desarrolla de forma mucho más complicada.

Dichas reacciones transcurren en dos etapas, y en una de éstas, como estado intermedio, se engendra el par nucleón—antinucleón, el cual después se aniquila, con la particularidad de que es de importancia el hecho de que este estado intermedio existe un lapso tan corto que la *indeterminación cuántica de energía*, a la cual ya nos hemos referido, permite desarrollarse a la reacción. Desde el punto de vista clásico, la reacción hubiera sido imposible, puesto que su desarrollo no concuerda con la ley de conservación de la energía en su interpretación clásica.

La reacción de desintegración del mesón π^+ (lo mismo se refiere, por supuesto, también a la desintegración del mesón π^-) debe examinarse de la siguiente forma. En la primera etapa el mesón π^+ se transforma en el par protón—antineutrón a costa de la interacción fuerte. Seguidamente, este par, ya a expensas de las interac-

ciones débiles cuadrifermiónicas se transforma en mesón μ^+ y neutrino muónico:

$$\pi^+ \xrightarrow[\text{(interacción fuerte)}]{} p + \bar{n} \xrightarrow[\text{(interacción débil)}]{} \mu^+ + \nu_\mu.$$

Estamos en condiciones de observar tan sólo los estados inicial y final; ésta es la razón de que aquí resulta enmascarado el carácter cuadrifermiónico de la interacción débil.

Durante la desintegración de la partícula Λ^0 ésta, a costa de las interacciones débiles se transforma, al principio, en protón y el par neutrón—antiprotón. En este caso, la extrañeza varía en una unidad:

$$\Lambda^0 \rightarrow p + \bar{p} + n.$$

Luego, el par neutrón—antiprotón se aniquila debido a las interacciones débiles, transformándose en mesón π^-:

$$\bar{p} + n \rightarrow \pi^-,$$

y el protón que se engendró en la primera etapa de la reacción sigue existiendo. En su conjunto, la reacción tiene la siguiente forma:

$$\Lambda^0 \xrightarrow[\text{(interacción débil)}]{} p + \underbrace{\bar{p} + n \longrightarrow p + \pi^-}_{\text{(interacción fuerte)}}.$$

En otras reacciones los asuntos van de forma parecida. No obstante, muchos problemas esperan todavía aquí su resolución.

Hipótesis de Weinberg

Desde el tiempo en que había sido escrita la última frase que usted acaba de leer pasaron relativamente pocos años. Decidimos dejar esta

frase, con tal de que ante el lector, por contraste, se presentasen con mayor relieve aquellos cambios considerables que se operaron en este campo en el período reciente.

Se trata no sólo de la acumulación de los hechos experimentales y de la profundización y ampliación del frente de las investigaciones. Tuvo lugar algo más significativo: surgió y ya adquirió, de modo bastante fundamental, la carta de naturaleza, una nueva idea física. La idea de un profundo parentesco y unidad de las interacciones electromagnéticas con las débiles. El primero la enunció en Harvard el profesor Weinberg. Se sobreentiende que las teorías físicas no surgen en un terreno vacío. A la hipotesis de Weinberg precedieron numerosas investigaciones teóricas, en particular, las que se referían al problema sobre el bosón intermedio.

Bosón intermedio

Este problema apareció en la teoría de las interacciones débiles relativamente mucho tiempo atrás. Como se habrá fijado el lector atento, existe una diferencia notable entre las interacciones débiles y todas las demás. La interacción electromagnética se realiza por medio del campo electromagnético. Los cuantos de este campo —fotones— son transportadores de la interacción entre las partículas eléctricamente cargadas.

Los transportadores de la interacción nuclear son, fundamentalmente, los mesones π. Mientras tanto, no hemos escrito ni una palabra acerca de los transportadores de la interacción débil.

En efecto, durante un plazo largo se admitía que todos los cuatro fermiones están en interacción en un punto y sin cualesquiera intermediarios. Con este enfoque ni hablar se podía acerca de algún campo de interacciones débiles ni de los cuantos de interacción débil.

¿De dónde proviene este carácter excepcional de las interacciones débiles y si existe en la realidad? Puede ser que un análisis más atento permitirá establecer que existe un campo de interacciones débiles y que, en correspondencia, deben existir partículas que transfieren esta interacción. Semejante hipótesis apareció ya hace mucho. Y no se encontraba, en modo alguno, contradicción explícita con el cuadro físico, que le precedía, de interacciones cuadrifermiónicas puntuales. Por cuanto el "radio de interacción", como ya sabemos, es tanto menor, cuanto mayor es la masa de los cuantos que transfieren la interacción, resulta que la "interacción no puntual" en tanto menor grado se diferencia de la "puntual" como más pesado es el cuanto del campo de interacción. Incluso el intercambio de los mesones π da lugar a interacciones que se dejan percibir solamente a distancias muy pequeñas, del orden de 10^{-13} cm. Y si atribuimos a los cuantos transportadores de la interacción débil una masa mayor (adelantándonos, diremos que ésta debe superar la π-mesónica más que en dos órdenes) llegaremos a unas interacciones que, en efecto, son extraordinariamente difíciles de distinguir de las puntuales: la diferencia se pone de relieve a distancias ínfimas, incluso en la escala microscópica, del orden de 10^{-14} cm.

De acuerdo con la expresión de L.B. Okuñ, en este caso, la partícula intermedia, como un muelle rígido, liga entre sí los pares de partículas. Si la energía transferida al muelle durante las colisiones es pequeña en comparación con su rigidez, el muelle interviene como un cuerpo sólido: a ello corresponde la interacción puntual cuando, de hecho, no ejerce su influjo la transferencia de la interacción por los cuantos. En cambio, si la energía es grande, el muelle ex-

perimenta deformación, lo que se puede descubrir por vía experimental.

La hipótesis sobre los cuantos cuyo intercambio es responsable por las interacciones débiles se desarrollaba en varias direcciones: era necesario comprender qué propiedades debían poseer estos cuantos, qué experimentos se podía y convenía poner e interpretar aquí y, finalmente, cómo se reflejaría esta hipótesis en la propia estructura lógica y matemática de la teoría.

A la primera de estas cuestiones la respuesta fue unánime: es preciso someter al análisis una partícula maciza con el espín igual a una unidad (en unidades $\hbar$); estas partículas se denominan bosones vectoriales pesados. Tan sólo esta variante —y solamente ésta— podía satisfacer los requerimientos del experimento existente en aquel período. En cuanto a la carga eléctrica de esta partícula, la misma se tomaba tanto positiva, como negativa, mas no igual a cero; sin embargo, como resultó más tarde, sin fundamento suficiente.

Dificultades de la teoría

Por regla general, los físicos-teóricos se deben satisfacer con la resolución aproximada de las ecuaciones llamadas a describir los objetos que se investigan. Con especial frecuencia se recurre al método de aproximaciones consecutivas cuando en la "aproximación cero", la interacción, en general, no se tiene en cuenta; en la "primera aproximación" se analiza el acto de interacción para una vez; en la "segunda", para dos veces, etc.

Así, pues, resulta que la situación en la teoría de las interacciones débiles es poco común. El "primer orden", o, en otras palabras, la "primera aproximación" bastante bien (aunque no

irreprochablemente) describe muchos hechos experimentales. El segundo orden —y los más altos— debían, al parecer, dar lugar tan sólo a correcciones ínfimas, por cuanto la interacción lleva el nombre de débil precisamente porque la "constante de interacción" es relativamente pequeña, es decir, los actos de interacción se realizan relativamente muy raras veces.

Sin embargo, el cálculo directo conduce, en la realidad, a un resultado muy distante del mencionado: la aportación del segundo orden y de los más altos resulta infinitamente grande.

La aparición de divergencias en una teoría —así se suelen denominar los valores infinitamente grandes que aparecen en la teoría al calcular cualesquiera magnitudes físicas, siempre es testimonio de una situación desafortunada en esta teoría, sugiriendo, además, que aquí existe cierto problema aún no resuelto. El problema de divergencias, como se decía antes, surge ya en la electrodinámica cuántica. Sin embargo, en este ámbito, valiéndose del llamado "procedimiento de renormación" se logra llegar a que la teoría proporcione a todas las magnitudes observadas razonables valores finitos. No obstante, no todas las teorías, ni mucho menos, admiten la realización de este procedimiento, o, hablando de otra forma, son susceptibles de renormarse. Aquí la cuestión radica en que, si los valores resultan infinitamente grandes tan sólo para un número limitado de magnitudes físicas (por ejemplo, únicamente para la carga de las partículas y para su masa), entonces, se puede, renunciando a la determinación teórica de estas magnitudes, utilizar simplemente sus valores experimentales. Y para todas las demás magnitudes, en este caso, se obtienen valores finitos lo que hace que la teoría sea capaz de trabajar. Ahora bien, es mucho peor si el número

de tipos de divergencia, de por sí, se torna ilimitadamente grande, lo que ocurre, precisamente, en el caso de la teoría de las interacciones débiles. La teoría de este tipo se denomina no renormable, o sea, es, de hecho, intrínsecamente contradictoria. La hipótesis sobre el pesado bosón vectorial cargado no corrige la situación, la teoría permanece no renormable y algunas dificultades hasta se profundizan.

Las búsquedas de la salida de esta situación realmente poco agradable condujeron al nacimiento de una nueva dirección bastante inesperada. Casi simultáneamente, S. Weinberg en EE.UU. y A. Salam en Trieste, de modo independiente, promovieron la audaz *hipótesis*, de la que hemos hecho mención antes, sobre la unidad de las interacciones electromagnética y débil.

Rasgos de unidad

Algunos rasgos de esta unidad se podían advertir también antes; en primer lugar, salta a la vista que los cuantos transportadores tanto de la interacción electromagnética, como de la débil tienen el mismo espín (igual a $\hbar$). Solamente los fotones cuyo intercambio lleva a las interacciones electromagnéticas no poseen masa en reposo, mientras que a algunos mesones vectoriales que transfieren las interacciones débiles (éstos se llaman habitualmente bosones W) debe atribuirse una masa bastante considerable.

Sin embargo, la unidad de que se trata está muy lejos de agotarse tan sólo por el carácter vectorial de las partículas intermedias. Un papel muy importante lo desempeña también otra hipótesis, la que sugiere que no es necesario introducir diferentes "cargas" para las interacciones electromagnéticas y para las débiles, que la carga es una sola, la ordinaria carga elemental

(o bien, es más cómodo tomar no e, sino la llamada constante de estructura fina $\alpha=e^2\hbar c$).

La primera impresión es que esta hipótesis se encuentra en una contradicción clara con el hecho evidente de que las interacciones débiles justifican su denominación precisamente porque son mucho más débiles que las electromagnéticas.

Sin embargo, esta objeción se elimina con un análisis más meticuloso. Como resulta, aquí la importancia decisiva la adquiere la masa en reposo de los cuantos intermedios. La distancia a que puede "volar" un cuanto de este tipo apartándose de la fuente que lo engendró es del orden de $\hbar/mc$. Para los fotones $m=0$ (como se señaló más de una vez anteriormente, éstos no tienen masa en reposo). Por esta razón, los fotones pueden llegar muy lejos, o, en otras palabras, el radio de las interacciones electromagnéticas es infinitamente grande.

Una cosa distinta son los bosones W. Incluso en el caso de que éstos se emiten con la misma frecuencia que los fotones (precisamente en ello consiste la hipótesis que discutimos), en virtud de que la "zona de su residencia" es infinitamente pequeña, la coincidencia de la "verdadera magnitud" de las interacciones electromagnéticas y débiles puede manifestarse tan sólo a distancias muy pequeñas. Pero estas distancias pequeñas se encuentran muy rares veces; es mucho más probable que la distancia entre las partículas resulta mayor que el "radio de interacción" $\frac{\hbar}{M_W c}$. Esta circunstancia implica el debilitamiento de la interacción. De modo formal, esto se refleja en la teoría por medio de que el papel de la constante eficaz de interacción no lo protagoniza la magnitud α, sino la magnitud proporcional $\frac{\alpha}{M_W^2}$; precisamente esta magnitud,

ahora ya no "fundamental", sino "derivada", se pone, con el nuevo enfoque, en el lugar de la constante universal de interacciones débiles.

Renormación

La teoría de Weinberg posee muchos rasgos atractivos. Y uno de los rasgos principales consiste en que esta teoría es renormable. El número de teorías renormables, es decir, de teorías en las cuales la determinación del número finito de parámetros físicos permite eliminar todas las magnitudes infinitas carentes de sentido, es muy pequeño: para contar estas teorías son más que suficientes los dedos de una sola mano. Ésta es la causa por la cual cada nueva variante de semejante teoría provoca un vivo interés. Y como hecho de primordial importancia se representa el que precisamente el intento de examinar, bajo enfoque único, dos tipos de interacciones conduce a la teoría renormable, pues, siendo de otro modo, la teoría no podría infundir gran confianza.

En la teoría de Weinberg la renormación se consigue debido a que, además de fotones y bosones vectoriales cargados (W^+ y W^-), se examinan también bosones vectoriales neutros (éstos se suelen designar con Z). Con la elección adecuada de las masas (el bosón Z debe ser dos veces más pesado que el bosón W, y la masa del W resulta casi 40 veces mayor que la del protón) parte de las infinidades se aniquila recíprocamente, y las divergencias que quedan se logran eliminar, aplicando la metodología de renormación.

Cuando se demostró el carácter renormable de la teoría de Weinberg, el interés hacia ésta creció bruscamente. Y este interés se acrecentó aún más cuando los experimentadores descubrieron

algunos de los efectos presagiados por dicha teoría. No sólo las revistas físicas, sino también las ediciones destinadas a los amplios círculos de lectores difundieron la noticia acerca del descubrimiento de corrientes neutras. Bueno, ¿qué corrientes son éstas?

Corrientes neutras

Como se ha señalado antes, los primeros intentos de introducir en la teoría un bosón vectorial intermedio se fundaron en la suposición de que este bosón debe llevar carga eléctrica. Al intercambiar este bosón, dos objetos que están en interacción intercambian también la carga. En cambio, si se admite que de transportador de interacción puede servir también un bosón neutro, entonces emergen unos nuevos vaticinios teóricos muy interesantes y, lo que de especial valor, susceptibles de una comprobación experimental directa; a la discusión de los mismos aún retornemos más adelante.

Puede parecer que el intercambio de un bosón neutro o el intercambio simultáneo de dos bosones W opuestos por su carga eléctrica deben arrojar resultados próximos, más aún que la masa de Z es precisamente dos veces mayor que la masa de W. Sin embargo, debido al valor pequeño de la constante de interacción, el intercambio simultáneo de un par de bosones resulta mucho menos probable que la "transferencia" de un cuanto. Precisamente debido a esta causa es posible centrar la atención sólo en el intercambio unibosónico, prescindiendo de las correcciones multibosónicas.

Después de dar esta explicación se hace evidente que, al introducir en el examen el bosón neutro, eliminamos la prohibición par muchas reacciones. Así, por ejemplo, semejante bosón puede transferir la interacción entre el neutrino

y tales partículas como el electrón, el protón y el neutrón, de modo que debe observarse experimentalmente la dispersión del neutrino en estas partículas. Antes de haber introducido el bosón neutro, la prohibición se extendía, por ejemplo, también a la reacción siguiente:

$$\nu_\mu + p \rightarrow \nu_\mu + n + \pi^+,$$

que se puede interpretar así: el neutrino muónico ν_μ, al volar cerca del protón p, afecta a éste de tal manera que el mismo, emitiendo el mesón π^+, se transforma en neutrón.

Pero, ¿qué cuanto puede intervenir como transmisor de la interacción? Evidentemente, tan sólo cierta partícula neutra, ya que es imposible tanto la absorción, como la emisión de partículas cargadas por el neutrino muónico.

De este modo, la anterior reacción es uno de los ejemplos del experimento en que se pone de manifiesto el bosón intermedio neutro. De otro ejemplo sirve la reacción

$$\nu_\mu + \mu^+ \rightarrow \nu_\mu + n + \pi^+.$$

El número de ejemplos similares se podía aumentar considerablemente.

En la electrodinámica, la fuente que emite y absorbe fotones es la corriente. El término "corriente" se extiende de forma natural también a los manantiales de absorción y emisión de cualesquiera cuantos intermedios. Ya que durante el intercambio de los cuantos neutros la "corriente" no cambia la carga (en particular, puede estar ligada al *movimiento de partículas no cargadas*), estas corrientes recibieron el nombre de neutras. El descubrimiento experimental de las corrientes neutras tuvo lugar, por primera vez, ya en el año 1973, después de lo cual seguían apareciendo datos nuevos y cada vez más completos obtenidos tanto por los investigadores

soviéticos, como por los de otros países. El descubrimiento de las corrientes neutras es uno de los más considerables logros recientes de la física.

Por qué son distintas las masas de los bosones

Al centrar nuestra atención en las corrientes neutras perdimos de vista un momento bastante importante que atañe a la teoría única de las interacciones electromagnéticas y débiles (interacciones "electrodébiles", como se denominan ahora). Hemos establecido que entre los fotones y bosones W hay algo en común: todas estas partículas (o, si quieren, campos) tienen un mismo momento propio de la cantidad de movimiento, es decir, un mismo espín. Pero, ¿no es esto insuficiente como para hablar sobre el "parentesco" de estas partículas y considerarlas representantes de cierta familia común? ¡Es que sus masas son tan distintas!

Sea como fuere, el establecimiento de este parentesco es necesario para poder hablar, con bastante motivación, sobre la naturaleza única de las interacciones débiles y electromagnéticas.

Que el lector nos perdone una pequeña digresión.

Vamos a hablar sobre el "parentesco". ¿Acaso sucede con frecuencia que somos capaces de advertir al instante incluso un parentesco próximo? Aquí no es obligatorio, en modo alguno, tener en cuenta los vínculos familiares entre personas. ¿Es que se parecen mucho el perro faldero que cabe en la palma de la mano y el enorme dogo? ¿O la fresa y la sandía? ¿O bien, la diminuta chispa que salta al chasquear el interruptor y el relámpago que hace rajarse el cielo?

Para descubrir los rasgos comunes es insuficiente meramente "mirar", es preciso comprender. Comprender tanto las causas de la comunidad, como las fuentes de diferencia.

Los físicos ya hace mucho notaron que las partículas elementales, de modo bastante natural, se dividen en grupos y que dentro de cada uno de éstos, claramente, se advierte la comunidad. Para no adelantarnos (tendremos que hablar todavía sobre el particular) nos limitemos, aunque sea, a un ejemplo: no en vano, los mesones π^+, π^- y π^0 son casi idénticos incluso por el nombre. No son tres partículas diferentes, sino tres diferentes "manifestaciones de carga" de una misma partícula; hablando en otras palabras, todos los mesones π se comportan de una forma absolutamente idéntica con respecto a todas las interacciones (¡excepto la electromagnética!).

Parece que el ejemplo de los mesones π sólo puede obstaculizar nuestro intento de reunir en una familia el fotón y los bosones W y Z . Es que todos los mesones π tienen masas casi iguales, mientras que aquí las masas varían desde cero para el fotón ¡hasta, aproximadamente, ochenta masas protónicas para el bosón Z!

A pesar de este hecho evidente, en este caso puede descubrirse la profundísima comunidad. La diferencia entre las masas no es primaria y prístina, sino se produce como resultado de la infracción espontánea de la simetría.

Al leer la última frase, muchos lectores, seguramente, no entendieron nada. ¿Qué es esta diferencia "prístina", o, por el contrario, la "ausencia de diferencia"? ¿Qué es esta enigmática "simetría" y cómo se debe comprender su infracción espontánea?

El término "simetría" al cual nos hemos referido ya antes, hoy en día se utiliza en la

física con mucha frecuencia. Se recurre a éste siempre cuando se quiere indicar que los objetos físicos poseen rasgos que no varían para tal o cual cambio de las condiciones. También pueden existir simetrías aproximadas. Así, en el ejemplo ya mencionado con los mesones π, la simetría entre estas partículas se infringe por las interacciones electromagnéticas.

Sin embargo, se pueden señalar muchos casos en que la simetría se infringe espontáneamente, es decir, por sí misma. Las cosas toman este cariz siempre cuando el estado de simetría corresponde al equilibrio inestable.

Figúrense, por ejemplo, que tienen ante sí un líquido. Éste es isótropo, es decir, todas las direcciones en el mismo gozan de igualdad de derechos. Supongamos que este líquido se enfríe lentamente hasta la temperatura de cristalización. Después de la cristalización la isotropía puede infringirse (surge la anisotropía), ya que en los cristales, por regla general, existen direcciones destacadas, de modo que muchas propiedades físicas vienen determinadas por dicha anisotropía. Bueno, ¿cómo es posible averiguar de antemano cuáles serán estas direcciones en el cristal obtenido del líquido isótropo? Oh, ésta es una cuestión dificilísima. Para formar una idea de ello, tendríamos que ocuparnos de fluctuaciones, cosa que por el momento, de ningún modo nos hace falta. Lo que sí importa es comprender solamente que el líquido enfriado, o bien, incluso sobreenfriado, se ve en la condición de equilibrio inestable, y apenas surge el centro de cristalización (y, por consiguiente, el germen de las "direcciones destacadas"), toda la sustancia, rápidamente, pasa a un nuevo estado de equilibrio, más estable, y tiene lugar la cristalización.

Insertemos otro ejemplo: el lector ha puesto

el lapicero sobre la punta. "De principio", por supuesto, semejante posición de equilibrio es posible, mas, en la realidad, es inalcanzable. Son suficientes perturbaciones como se quiera pequeñas para que el lapicero caiga. Pero, ¿a dónde le es más "ventajoso" caer: a la derecha o a la izquierda? ¡Está claro que le es indiferente! En este sentido, todas las direcciones son absolutamente simétricas. Pero en el caso de que la caída, a pesar de todo, comenzó, por ejemplo, a la derecha, resulta que la simetría llevada implícita en las condiciones iniciales (es decir, en las ecuaciones del movimiento y en las condiciones de partida) inmediatamente se altera.

La caída del lapicero a la derecha o a la izquierda puede originar consecuencias muy diferentes, por ejemplo, éste caerá a la calle o a la habitación. Sin embargo, ningunas acciones externas finitas que infringen la simetría de ningún modo llevan la responsabilidad por todas estas diferencias: aquí tenemos ante nosotros precisamente el ejemplo de su infracción espontánea.

Se sobreentiende que lo expuesto no es sino una analogía. Pero una analogía bastante profunda. En la teoría de Weinberg, la diferencia en las masas de las partículas que transfieren la interacción tampoco se "introduce" en las ecuaciones dinámicas iniciales, las que, en este sentido, poseen simetría. Sin embargo, esta teoría es de tal índole que en ella se engendra la espontánea infracción de la simetría, la cual da lugar a la aparición de un considerable desdoblamiento por las masas en los diferentes bosones. Precisamente esta circunstancia vela la unidad "prístina" de estas partículas y, con ello, también la unidad de la naturaleza de las interacciones electromagnéticas y débiles.

La teoría de la cual acabamos de contar brevemente apareció hace poco. En ésta dista mucho de ser esclarecido y consumado todo. Tal vez se necesite precisar algunas tesis. Pero la idea principal se presenta tan profunda y sugestiva que, involuntariamente, se quiere creer en el advenimiento de una nueva etapa en la física, una etapa cuyo rasgo distintivo es la disminución del número de tipos de las interacciones fundamentales y el descubrimiento de la unidad allí donde antes ni siquiera se haya sospechado nada semejante.

3. Neutrino y la evolución del Universo

El neutrino en el Universo

Retornemos otra vez al problema sobre el papel que el neutrino desempeña en el Universo. Ya nos hemos acostumbrado a que esta partícula, de buen grado, irrumpe en todos los campos.



En las estrellas se opera una serie de procesos que vienen acompañados con la emisión de neutrinos. No es difícil comprender en qué radica aquí el asunto. Es que la fuente principal de energía de las estrellas son las reacciones de fusión de los núcleos. En la cadena de los pro-

cesos que, en fin de cuentas, dan lugar a la transformación de cuatro protones en partícula α (núcleo de helio) se engendran dos positrones, lo que, obligatoriamente, debe acompañarse con la expulsión de dos neutrinos. Los positrones se aniquilan con los electrones, mientras que los neutrinos abandonan la estrella. Sobre cada centímetro cuadrado de la superficie de la Tierra, solamente proveniendo del Sol, caen cada segundo más de 10^{11} neutrinos.

Además, en el espacio universal tienen lugar las desintegraciones de las partículas elementales, mesones e hiperones. Todas estas desintegraciones vienen acompañadas con el nacimiento de neutrinos y antineutrinos.

¿Y cuál es el destino posterior del neutrino? Estas partículas omnipenetrantes, como se entiende, atravesarán, sin duda, el cuerpo de la estrella, incluso en el caso de que se han engendrado en algún lugar de sus profundidades, y se alejarán volando arrastrando consigo la parte de la energía que les corresponde. Siendo pequeña la densidad del Universo, los neutrinos lo atravesarán sin absorberse. Por esta causa *los neutrinos deben acumularse en el Universo*.

Además, como lo veremos más adelante, no se excluye la posibilidad de que en la primera etapa de la expansión del Universo los neutrinos, en general, constituyeron una parte considerable de la materia del Universo. En lo fundamental, estos neutrinos se conservaron hasta el momento actual, aunque, por cierto, llegaron a perder, durante la expansión del Universo, una parte considerable de su energía.

¡Ojalá sepamos construir "neutrinorreceptores" tan sensibles como los radiorreceptores! ¡Cuantos datos de extraordinaria importancia podríamos obtener! Obtendríamos la posibilidad de "echar una ojeada" al centro de las más

grandes estrellas, ya que los neutrinos se fugan de su seno, llevando consigo ciertos "recuerdos" sobre los procesos que acompañan su nacimiento. Los neutrinos permitirían hacer la "radioscopia" de galaxias enteras mejor de los rayos X radiografiando un pliego de papel.

Pero es mucho más importante otro papel de los neutrinos: a éstos pertenece una parte sustancial de la masa de la materia en el Universo. Ahora bien, de la densidad de la materia depende si el Universo irá expandiéndose eternamente, o bien, para sustituir la expansión llegará la compresión. Esta cuestión adquirió especial actualidad después de que, en 1980, apareciera la comunicación de los físicos soviéticos cuyos experimentos demostraron la existencia en el neutrino de la masa en reposo. Por muy pequeña que sea esta masa —resulta más que 20 mil veces inferior a la del electrón— su existencia puede llegar a ser decisiva para todo el Universo.

Ya actualmente los científicos comienzan a diseñar instrumentos que nos acercan a la era de la astronomía neutrínica. Los primeros éxitos están a la vista. Un grupo de físicos norteamericanos descubrió neutrinos de alta energía engendrados por los rayos cósmicos.

También se detectaron neutrinos de energía más baja nacidos en el interior de las estrellas. Está claro que, realmente, se puede tratar del descubrimiento de neutrinos solares.

En un pozo de las minas de Dakota del Sur (Estados Unidos), a la profundidad de 1490 m fue creada una instalación para la detección de los neutrinos solares en que se utilizó (a propuesta de B. Pontecorvo) la reacción

$$\nu_e + {}^{37}\mathrm{Cl} \rightarrow {}^{37}\mathrm{Ar} + e^-.$$

Por impacto del neutrino el núcleo de cloro se transforma en núcleo radiactivo de argón.

Este núcleo experimenta la captura K con el tiempo de vida de 35 días.

El recipiente cilíndrico contenía 380 000 litros de CCl_4. El argón originado se extraía dejando pasar a través del recipiente 20 000 litros de helio. Seguidamente, el argón se congelaba recurriendo al enfriamiento hasta la temperatura de 77 K.

Los experimentos duraron varios años, pero, como resultado, no fue detectada la cantidad de neutrinos presagiada por la teoría. Es posible que en estos cálculos la temperatura en el seno del Sol se suponía demasiado alta ($14{,}9 \cdot 10^6$ K).

Por lo demás, incluso ahora, sin tener siquiera "neutrinorreceptores" hasta cierto grado fiables, gracias a estas partículas nos enteramos de muchas cosas en la evolución del Universo y de las estrellas, cosas que antes ni se sospecharan.

Evolución de las estrellas

Actualmente, la opinión general es que las estrellas se formaron como resultado de la condensación gravitacional del gas enrarecido, fundamentalmente, del hidrógeno. Las fuerzas gravitacionales, al comprimir la sustancia, provocan su calentamiento. Cuando la temperatura alcanza varias decenas de millones de grados se inician las reacciones termonucleares. En lo sucesivo, la combustión ininterrumpida de las estrellas se realiza precisamente a costa de éstas. Las estrellas se "nutren" de hidrógeno, transformándolo en helio; el proceso viene acompañado con el desprendimiento de energías gigantescas. Pero, en cualquier estrella las reservas de combustible están limitadas. Bueno, ¿que ocurrirá en la estrella después de la combustión del hidrógeno?

En el estado estacionario, cuando las reservas de combustible son todavía grandes, las estrellas

se encuentran en equilibrio, por cuanto la presión gravitacional, que tiende a comprimir la estrella, se compensa por la presión de las partículas del gas que integran la misma y por la presión lumínica*. A medida que el hidrógeno se consume en las zonas centrales de la estrella ésta comienza a comprimirse. Lo importante es que la temperatura de la estrella, en este caso, se acrecienta a costa de la disminución de la energía gravitacional debida a la compresión.

A las temperaturas de centenares de millones de grados, durante la colisión de tres núcleos de helio, en las estrellas lo suficientemente macizas se forman núcleos de carbono. Al chocar con los núcleos de helio, los núcleos recién formados originan hidrógeno, neón, etc.

El proceso de esta índole termina en los núcleos de hierro, puesto que todas las reacciones anteriores dan lugar a la liberación de la energía, mientras que durante la formación de núcleos más pesados que el hierro la energía se absorbe. Por lo demás, para las estrellas de masa pequeña el proceso concluye en núcleos más ligeros, por ejemplo en los de manganeso.

Como resultado, si la masa de la estrella es menor que 1,2 de la del Sol, se produce una configuración estable conocida con el nombre de enana blanca. La enana blanca más conocida es el satélite de Sirio, una estrellita pequeña que se pierde en los rayos de su brillante vecino.

Las enanas blancas representan la posible etapa final de evolución de las estrellas. La luminosidad de las mismas es pequeña, pero teniendo la masa del orden del Sol, su radio sólo es del orden del de la Tierra o de Urano. La densidad de las enanas blancas es anorme: ¡10^8 g/cm^3!

---

* A altas temperaturas de la estrella, su materia se encuentra en estado de gas ionizado (plasma).

En estas condiciones los átomos son completamente ionizados, y la estrella está constituida por núcleos y electrones densamente empaquetados.

Las enanas blancas no son la única configuración posible de la estrella después de haberse consumido el combustible nuclear. Si la masa de la estrella es mayor que 1,2 masas del Sol, entonces, comenzando desde cierto momento, durante una compresión grande de la estrella, los electrones empiezan a "incrustarse" en los núcleos y por medio de la reacción

$$e^- + p \rightarrow n + \nu$$

transforman los protones en neutrones. Los neutrinos abandonan la estrella y los neutrones quedan.

Este proceso de "neutronización" de la estrella *conduce a su compresión catastróficamente rápida*. En fin de cuentas, de una estrella común y corriente se origina una estrella estable de neutrones con un radio solamente de varios kilómetros, que incluye una cantidad ínfima de electrones y protones. La sustancia, en este caso, presenta una densidad monstruosa: de 10^{14} g/cm³. Ésta es densidad nuclear.

La desintegración de los neutrones en la estrella siguiendo el esquema ordinario

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$$

resulta imposible debido al principio de exclusión de Pauli. He aquí en qué radica el asunto en este caso.

La zona del movimiento de los electrones está limitada por las dimensiones de la estrella. Y de acuerdo con la mecánica cuántica, durante el movimiento limitado la energía del electrón no puede ser arbitraria, al igual que en el átomo son posibles únicamente valores discretos deter-

minados de la energía. Si la estrella se representa en forma de un cajón lleno de electrones y de otras partículas, con la particularidad de que cuanto mayor es la energía de la partícula tanto más alto está dispuesta la misma sobre el fondo del cajón, entonces, este cajón debe concebirse teniendo una multitud de anaqueles aislados. Corresponde a la posición en un anaquel determinado una energía determinada de la partícula. Existen anaqueles para los electrones, para los protones, etc.

De conformidad con el principio de exclusión de Pauli no existen dos electrones en un estado. Por esta razón, en un anaquel electrónico se encuentran no más de dos electrones con espines orientados en sentidos opuestos. Para temperaturas no muy altas, todos los anaquelas inferiores hasta llegar a cierto anaquel correspondiente a la energía máxima E_m del electrón, estarán llenos. Como se suele decir, el gas electrónico se encontrará en estado degenerado, él tendrá una energía mínima posible de acuerdo con la mecánica cuántica*.

Así, pues, el neutrón no puede desintegrarse si la energía del electrón que se engendra durante la desintegración es menor que la máxima. No olviden que todos los anaqueles energéticos inferiores ya están ocupados. Todo ocurre de modo como si el neutrón "conociese" que no puede desintegrarse sin infringir las leyes de la mecánica cuántica, y por lo tanto queda estable.

Al igual que en el caso de las enanas blancas, la compresión de la estrella debe acompañarse con el aumento de la temperatura. Pero ahora, por cierto tiempo, la temperatura ya se eleva

---

* Cabe señalar, del paso, que en las enanas blancas el gas electrónico también se encuentra en estado degenerado.

hasta tal punto que la estrella es capaz de irradiar los rayos X.

Es completamente posible que la brusca compresión aumente la temperatura en tal medida que tendrá lugar una explosión. Entonces observaremos la aparición de una supernova.

En 1967—1968 las estrellas de neutrones fueron descubiertas experimentalmente. Un grupo de investigadores de Cambridge, con la ayuda de radiotelescopio, descubrieron una radiación pulsatoria en la longitud de onda de 3,7 m. Los impulsos regulares seguían con intervalos un poco mayores que un segundo. Al principio, los científicos pensaron que, acaso, estos impulsos eran señales de otra civilización. Por esta razón, la publicación del artículo se demoró para cierto período. Sin embargo, más tarde se descubrieron nuevos objetos que emitían radioimpulsos con otros intervalos. Estos objetos recibieron el nombre de *pulsares*.

Los pulsares son estrellas de neutrones que giran rápidamente. Si esta estrella emite ondas electromagnéticas radialmente y en una dirección determinada (lo más probable, en la dirección del eje magnético de la estrella), entonces, la emisión, en cualquier dirección, pulsará con una frecuencia igual a la de su rotación alrededor del eje.

Para el año 1974 fueron descubiertos más de 130 pulsares. Y algunos de éstos emiten impulsos no sólo de ondas radioeléctricas, sino también de luz visible o, incluso, de rayos X.

Actualmente, no quedan dudas de que los pulsares son estrellas de neutrones, por cuanto no hay otra estrella alguna que pueda girar con velocidad angular desde 33 microsegundos hasta 3,5 segundos (períodos medidos entre los impulsos para diferentes pulsares). Las fuerzas centrífugas la hubieran roto.

La estrella de neutrones representará una configuración estable si su masa no supera la masa duplicada del Sol. ¿Y qué será de la estrella si su masa resulta ser mayor?

De acuerdo con la teoría de Oppenheimer y Snyder, la estrella experimentará una contracción ilimitada y se derrumba bajo su radio gravitacional. El estado estacionario de la estrella es imposible. Ocurre el llamado colapso gravitacional.

El radio gravitacional determina las dimensiones críticas del cuerpo y depende, además de la masa, también de la velocidad de la luz c y la constante gravitacional $\varkappa$:

$$r_0 = \frac{2m\varkappa}{c^2}.$$

Como se desprende de la teoría de la gravitación de Einstein, no hay partícula alguna que pueda encontrarse en reposo dentro de la esfera limitada por el radio gravitacional. Todas las radiaciones y señales son capaces de propagarse solamente hacia el centro. Su caída en el centro es incontenible, sin embargo, para un observador desde fuera, esta caída durará un período infinitamente largo debido a la intensísima retardación de la marcha del tiempo en el enorme campo gravitacional de la estrella.

En este caso, debe presentarse al observador externo el siguiente cuadro.

La luminosidad de la estrella durante el colapso gravitacional disminuye con gran rapidez y, simultáneamente, la estrella se "enrojece". En el intenso campo gravitacional de la estrella aumentan las longitudes de onda de la radiación. Ya pasadas unas fracciones de segundo después del comienzo del enrojecimiento marcado, la estrella deja de ser visible y forma el agujero negro. La luz resulta incapaz de superar la

atracción gravitacional y desprenderse de la estrella. La estrella cuya masa sobrepasa la del Sol más que al triple se transforma en una esfera absolutamente negra de tamaño tan sólo de varias decenas de kilómetros. Únicamente el potente campo gravitacional en torno al agujero negro testimonia su existencia.

Así se opinaba todavía en tiempos recientes. Pero, luego, se demostró teóricamente que en el campo gravitacional del agujero negro deben nacer parejas "partícula—antipartícula", con la particularidad de que una de las partículas se "succiona" al agujero, mientras que la otra se aparta; exteriormente, este efecto cuántico tiene el aspecto de "evaporación" del agujero negro.

En los años 60 se prestó atención a que el agujero negro puede advertirse en los sistemas de estrellas binarias en los que una de las estrellas es normal. Basándose en el efecto Doppler, se puede descubrir la rotación de esta estrella normal alrededor de un centro de gravedad común para la misma y para el agujero negro y evaluar la masa del último.

No obstante, la sola evaluación de la masa de la estrella invisible (debe superar más que al triple la masa del Sol) en el sistema de estrellas binarias es todavía insuficiente. Puede suceder que la segunda estrella, meramente, irradia muy poco. Mas en 1964 se demostró que el agujero negro en un sistema binario estrecho arranca, atrayéndolo hacia sí, el gas de su estrella-satélite. Este gas, al caer sobre el agujero negro, se calienta hasta tal grado que puede emitir la radiación Roentgen. El campo gravitacional de la estrella normal es demasiado pequeño para dicho objetivo. Y he aquí que en la constelación del Cisne X-1 se descubrió un componente de una estrella normal cuya masa supera 8 veces la del Sol. Simultáneamente, este objeto inter-

viene como fuente de radiación Roentgen. Dicha circunstancia testimonia, con gran probabilidad, que en la constelación del Cisne X-1 existe un agujero negro. Sin embargo, sea como fuere, no todos los científicos, ni mucho menos, consideran indiscutibles los razonamientos aducidos.

Etapa primaria de evolución del Universo

Al hablar del Universo en expansión, ya hemos hecho mención sobre uno de los problemas cardinales: ¿de qué se componía la materia del Universo en el momento de su máxima compresión? El estado inicial del Universo debe ser tal que, de principio, hubiese permitido explicar aquel cuadro del mundo que observamos actualmente.

Se sugirió la hipótesis de que en estado superdenso el Universo estaba constituido por neutrones fríos. Debido a las mismas causas que en el interior de la estrella de neutrones los mismos no se desintegrarán.

En el primer momento el Universo se expande con extraordinaria rapidez y al cabo de 15 minutos del comienzo de la expansión su densidad debe igualarse a la del agua. Durante la expansión los "anaqueles de energía" para los electrones, en correspondencia con las leyes de la mecánica cuántica, se disponen cada vez más cerca unos de otros, de modo que muy pronto, la energía del electrón en el anaquel superior ocupado llegará a ser menor que la del electrón engendrado durante la desintegración del neutrón. Éste es el motivo de que los neutrones comenzarán a desintegrarse, dando lugar a la aparición de los protones.

Durante el impacto de los protones con los neutrones se forman núcleos de hidrógeno pesado,

los deuterones. Éstos chocan unos con otros, así como con los protones, formándose núcleos de helio y de tritio, o sea, de hidrógeno superpesado. Como resultado, el Universo, muy de prisa, se ve empobrecido de protones. Ésta es la situación con el modelo dado. Pero en la realidad, en la primera etapa de evolución del Universo, la materia, en un 70%, estaba integrada por hidrógeno. Y si hoy en día las estrellas arden con intenso brillo, esto se debe, precisamente, a que las reservas de hidrógeno en ellas fueron muy grandes. Ésta es la razón por la cual la hipótesis neutrónica del estado inicial del Universo perdió su valor.

También resultaron inconsistentes todas las demás teorías sobre el Universo frío en su estado inicial. Esta cuestión se aclaró más o menos después de que en 1965 se descubrió una radiación térmica cósmica con la temperatura de 3 K (por la escala absoluta de Kelvin). La radiación extraterrestre fue detectada con la ayuda de los radiotelescopios, primero en la onda de 7,35 cm y más tarde también en otras ondas. Su máximo corresponde a la longitud de onda de 1,5 mm. En relación con su origen esta radiación recibió el nombre de *radiación negra*.

La existencia de una radiación térmica cósmica se logra explicar solamente suponiendo que el Universo en el período próximo al comienzo de la expansión fue muy caliente. Al cabo de muchos años después del comienzo de la expansión la materia del Universo, por lo visto, se componía de electrones, protones y núcleos de helio. Además, se tenía la radiación electromagnética: ondas radioeléctricas, luz y rayos X que se encontraban en equilibrio térmico con las partículas. Durante la posterior expansión tanto la materia, como la radiación se enfriaban, a se-

mejanza de como se enfría el gas en un cilindro si su volumen aumenta. Al transcurrir centenares de miles de años la temperatura disminuyó hasta varios mil grados. En estas condiciones los electrones se unieron con los protones formando átomos de hidrógeno. La densidad de la sustancia disminuyó hasta tal punto que ésta llegó a ser transparente a los fotones. Como resultado, prácticamente cesó el proceso de emisión y absorción de los fotones. Según la expresión de V. L. Guinsburg, la radiación se "desgaja" de la sustancia. En lo sucesivo, su temperatura se rebaja y al pasar un lapso de cerca de $1,7 \cdot 10^{10}$ años (la supuesta edad del Universo) llega a 3 K. Con una precisión de hasta una milésima no se da diferencia entre las intensidades de la radiación negra en dependencia de la dirección. Este hecho significa que la expansión del Universo, con una exactitud admirable, en el transcurso de 99,9% de todo el tiempo de existencia del Universo, se desarrollaba con rigurosa igualdad por todos los lados.

He aquí lo que, a todas luces, ocurría en la etapa más temprana de evolución del Universo. Al cabo, aproximadamente, del tiempo $\tau \approx 10^{-6}$ s después del comienzo de la expansión, a las temperaturas superiores a 10^{12}K, entre los bariones quedan tan sólo los nucleones: los protones y los neutrones. Éstos, ininterrumpidamente, se transforman unos en otros por medio de interacciones fuertes con la participación de los mesones π y de los fotones:

$$p + \pi^- \rightleftarrows n + \gamma, \qquad n + \pi^+ \rightleftarrows p + \gamma.$$

A temperaturas inferiores a 10^{11} K la cantidad de mesones π disminuye bruscamente debido a la escasez de energía necesaria para su naci-

miento. Las transformaciones mutuas de los nucleones comienzan a transcurrir por el siguiente esquema:

$$n + e^+ \rightleftarrows p + \overline{\nu}_e, \qquad n + \nu_e \rightleftarrows p + e^-,$$
$$n \rightleftarrows p + e^- + \overline{\nu}_e,$$

es decir, a costa de las interacciones débiles con la participación de neutrinos, electrones y positrones.

Cuando la temperatura cae por debajo de 10^{10} K (al cabo del tiempo $\tau \approx 1$ s después del comienzo de la expansión) empieza a disminuir bruscamente la concentración de los pares electrón—positrón, alterándose el equilibrio termodinámico entre los protones y neutrones. Hasta el momento en que la desintegración de los neutrones se haya hecho sustancial, la relación entre el número de protones y neutrones queda invariable. Para $\tau \approx 10$ s en el Universo se dan cerca de 83% de protones y 17% de neutrones. Sin embargo, mientras la temperatura no llegue a ser menor que 10^9 K, la colisión de los protones y neutrones no conducirá a la formación de deuterones, puesto que los fotones de alta energía los destruyen. Al pasar $\tau \approx 100$ s la temperatura cae por debajo de 10^9 K y comienza la formación de deuterones. Al chocar éstos entre sí se forma helio. Este proceso continúa hasta que todos los neutrones entren en la composición de los núcleos de helio. Su concentración, como lo demustran los cálculos, debe constituir un 30% de toda la masa de la materia del Universo. Esta cifra se encuentra en buena correspondencia con la concentración del helio conocida actualmente por medio de las observaciones.

La ausencia en la naturaleza de núcleos estables con los pesos atómicos iguales a 5 y 8 impide la formación, dentro de los marcos del modelo

del Universo caliente, de núcleos más pesados que el helio. El número total de éstos constituye tan sólo cerca de 0,1% de todos los núcleos del Universo (de los núcleos de hidrógeno y helio, por excelencia). De conformidad con las concepciones modernas, la síntesis de los elementos pesados tuvo lugar en las etapas mucho más tardías de *evolución del Universo*, *operándose* en las profundidades de las estrellas formadas y durante los procesos explosivos del tipo de estallidos de las novas y supernovas. En la formación de este cuadro un lugar importante pertenece al físico soviético Ya. B. Zeldóvich.

Hace medio siglo, aproximadamente, en la ciencia apareció la palabra "neutrino" y se dio inicio a una cadena sorprendente de descubrimientos los cuales relacionamos con aquello que se denomina interacciones débiles.

Nuestra información sobre el mundo se hizo más rica, pero, al mismo tiempo, hoy, con mayor claridad que ayer, percibimos el aliento de aquel "océano de lo ignoto" a que se refería Newton ya hace tres siglos.

En una vieja y herrumbrosa palangana
Tres eruditos se hiciron a la mar.
Si ésta menos agujeros ostentara,
Tendríamos más cosas para contar.

Canción infantil inglesa

CAPÍTULO VII

FUERZAS "¿?" Y LAS PARTÍCULAS ELEMENTALES

1. ¿Qué son las partículas que llevan el nombre de resonancias?

Partícula elemental. . . ¿Y qué es esto?

Desde los tiempos de Demócrito y hasta los días presentes, en miles de libros se repite en todas las formas la palabra "átomo". El "átomo" significa indivisible. La existencia de los átomos se negaba, la existencia de los átomos se ponía en tela de juicio, a su existencia se dio crédito, mas (y no se puede negar que en ello hay algo curioso), una vez hecho esto, muy pronto se cercioraron de que, en esencia, los átomos no justifican su nombre. Aquellos átomos de los cuales hoy en día tiene noción cada escolar, poseen una estructura bien estudiada. Ellos se pueden "desmembrar".

Los átomos son divisibles, y su división se convirtió en factor decisivo de toda nuestra vida. Constan de partículas más pequeñas. ¿Quizá a estas partículas, a las mismas, conviene transferir la denominación "átomo"? De hecho, se procedió precisamente de esta manera, sólo

que cambió la terminología: las partículas comenzaron a llamarse elementales.

Partícula elemental... Y, hablando con propiedad, ¿qué es esto? Según la obresvación de Corbin y de Benedetti, en la palabra "elemental" se encierra una admirable ambigüedad. Puede significar tanto aquello que se entiende de una vez, como algo hasta tal punto fundamental que, por ahora, nadie todavía lo ha entendido. Precisamente en este último sentido las partículas subatómicas se denominan ahora elementales.

Por lo demás, al principio todo parecía sencillo: son corpúsculos de materia rudimentarios que no permiten su ulterior fragmentación. El descubrimiento de cada nueva partícula constituía y sigue constituyendo un triunfo relevante de la ciencia. Pero ya hace cuarenta años, a cada triunfo de turno comenzó a mezclarse cierto dejo de inquietud. Éstos se convirtieron en demasiado frecuentes. El número de partículas sobrepasó la cifra de treinta. ¿Será posible que todas ellas sean elementales? Es que entre las mismas se encuentran tales como el muon que hasta la fecha parecen ser un incomprensible capricho de la naturaleza. Aparentemente, nuestro mundo, con tranquilidad, podría pasar sin éstas.

Hay otra circunstancia que no carece de valor. La mayoría de las partículas no es eterna. Éstas nacen y viven cierto tiempo que se calcula desde varios minutos para el neutrón hasta fracciones ínfimas de segundo para el mesón π^0 y otras partículas. Luego se mueren, engendrando partículas nuevas.

Sea como fuere, después de ciertas vacilaciones, los científicos creyeron racional considerar todas las partículas como elementales, calificando su perecimiento no como desintegración en partes componentes, sino como transformación de unas

en otras. El quid de la cuestión reside en que las partículas descendientes, como ya se subrayó antes, guardan una relación completamente distinta respecto a las partículas "padres" que los cascos de un jarrón roto respecto al recipiente intacto existente originalmente.

Partículas de vida mínima

La situación en la física de las partículas elementales, de por sí, estaba muy tensa, cuando tuvo lugar un acontecimiento que la agudizó hasta el extremo. Fue descubierta una nueva serie de partículas con el tiempo de vida tan corto que, en comparación con las mismas, el mesón π^0, una de las partículas de duración mínima, puede parecer inmortal. Es mil millones de veces más "longeva".

El tiempo de vida de estas partículas (10^{-23} s) es tal que no dejaban huella alguna en la cámara de Wilson. Éstas nacen y casi al mismo instante expiran, al recorrer una distancia del orden de las dimensiones del protón (10^{-13} cm).

Inmediatamente surgió la pregunta natural: ¿es conveniente o no incluir estas partículas en la lista ya conocida de partículas elementales? Por una parte parecía que sí. Al igual que las partículas ordinarias éstas se caracterizan por la masa, la carga, por el tiempo de vida, el espín, etc. Sin embargo... ¡demasiado breve es su vida! Sólo se puede maravillar de qué modo, en general, los científicos lograron descubrir la existencia de estos objetos. Pero, no obstante, el descubrimiento fue hecho, y, además, de forma muy convincente.

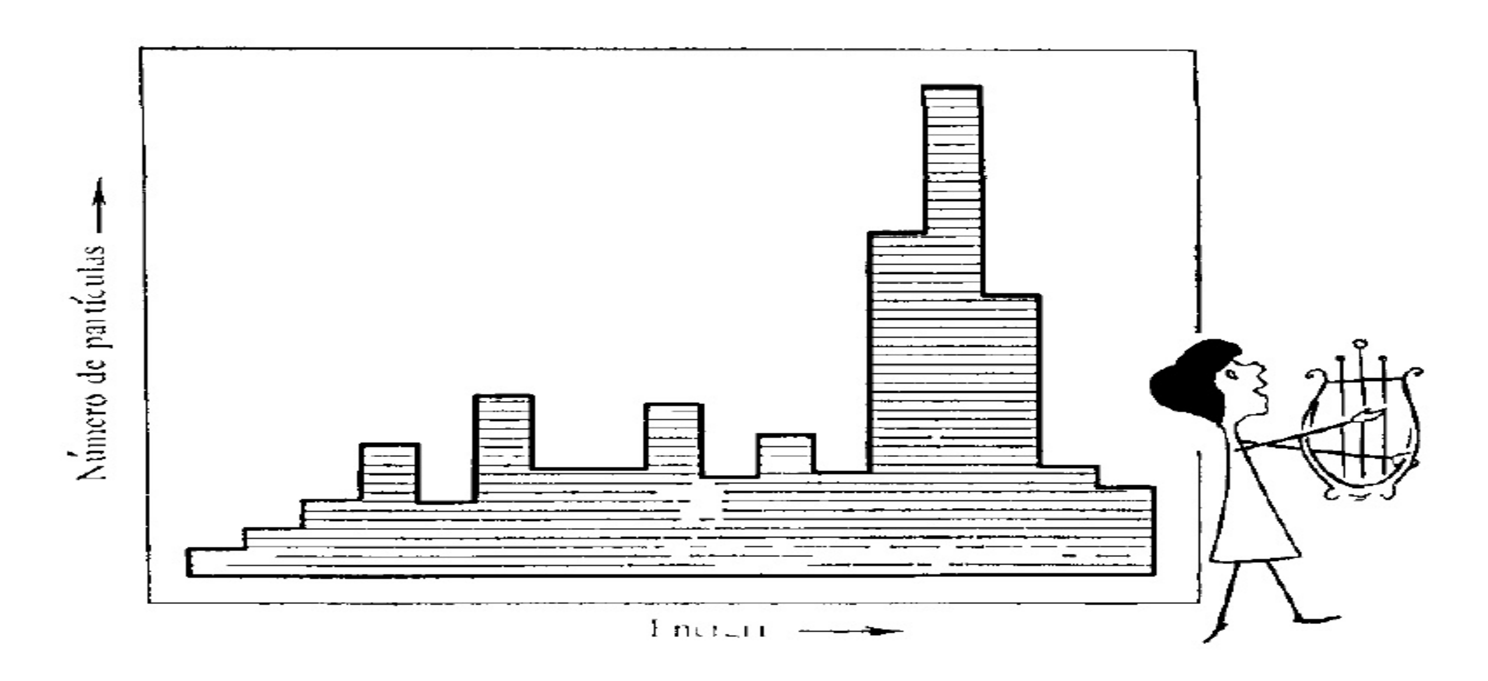
Resulta, pues, que también lo inatrapable puede detectarse por vía experimental.

La denominación de las partículas: resonancias o partículas de resonancia, más bien dice

no sobre la naturaleza de éstas, sino, precisamente, sobre los métodos con cuya ayuda fueron detectadas.

¿Cómo se puede descubrir lo inatrapable?

El primer grupo de partículas de resonancia fue descubierto al estudiar la dispersión de los mesones π en los nucleones (protones y neutrones). Al irradiar un blanco que contenía hidrógeno con un haz de mesones π positivos, los científicos descubrieron que, para la energía cinética de los mesones π igual a 200 millones de electronvoltios, éstos se dispersan con especial intensidad. Como dicen los físicos, se observa la resonancia: a una energía determinada el número de mesones dispersos aumenta bruscamente.



Hablando metafóricamente, se puede suponer que el mesón π y el protón se "fusionan" para cierto rato, transformándose en una nueva partícula la cual, después, vuelve a desintegrarse en mesón π y protón. Basándose en las leyes de

conservación de la energía y el impulso es fácil determinar la masa de esta partícula. Ésta resultó ser igual a 1236 millones de electronvoltios, si la masa se expresa, como está admitido actualmente en la física de las partículas elementales, en unidades energéticas.

Sin decidir de antemano la cuestión sobre la verdadera naturaleza del estado intermedio (su designación es Δ^{++}), los físicos, con cautela, le dieron el nombre de partícula de resonancia (o, simplemente, resonancia) para recalcar la naturaleza no del todo clara de esta formación.

El lector, probablemente, conozca la palabra "resonancia". El diapasón en que cae la onda sonora resuena, es decir, oscila con máxima intensidad cuando la frecuencia de las oscilaciones acústicas coincide con la frecuencia propia del diapasón. Este cuadro es típico para la dispersión de las ondas de cualquier naturaleza.

Recordemos ahora que en la mecánica cuántica se establece una relación sencilla y general entre la frecuencia y la energía. La última se diferencia de la primera sólo por el factor h (constante de Planck). Por consiguiente, en el lenguaje cuántico, la resonancia corresponde al caso en que la energía de las partículas que se dispersan (las cuales, de acuerdo con la dualidad onda-corpúsculo, son simultáneamente ondas) coincide con las energías "permitidas" para el dispersador. Estas energías "permitidas" portan una información muy importante: son proporcionales a las masas de aquellas partículas —que, precisamente, se denominan "resonancias"— las cuales, por instantes mínimos, se engendran en las etapas intermedias de dispersión.

Por el ancho de la curva de resonancia (es decir, del gráfico que indica la probabilidad de la dispersión en función de la energía de la partícula impactante) se puede evaluar el tiempo

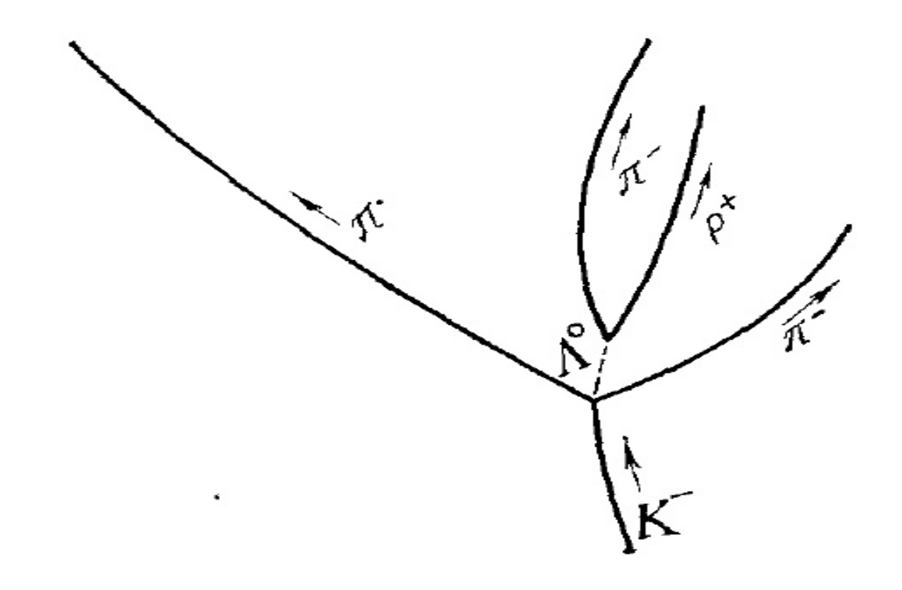
de vida de la resonancia. En este caso, acude en ayuda la relación de indeterminación de Heisenberg entre la energía y el tiempo. El ancho de la curva da el orden de indeterminación de la energía de la resonancia ΔE. Su tiempo de vida es

$$\Delta t \sim \frac{h}{\Delta E}.$$

Este tiempo resulta igual, aproximadamente, a 10^{-23} segundos. Al desplazarse con la velocidad próxima a la de la luz, el mesón, en este lapso, recorrerá una distancia de 10^{-13} centímetros, igual, precisamente, a las dimensiones de la zona de interacción del mesón con el protón.

¿Dónde puede encontrarse un blanco hiperónico?

Cuando fueron descubiertas las resonancias relacionadas con la dispersión de los mesones π en los nucleones, casi no había investigador alguno quien dudase de que las resonancias no eran particularidad de tales sistemas, únicamente. En efecto, se logró descubrir las resonancias también en los sistemas del tipo mesón—hiperón (resonancias bariónicas). Se halló, asimismo, un grupo de resonancias mesónicas ($\pi - \pi$, $\pi - K$, $K - K$, etc.). Sin embargo, en estos casos las mismas ya no se pueden detectar, estudiando la dispersión de las partículas unas en otras. Se trata de que es imposible crear un blanco, por ejemplo, de hiperones Λ^0. Los hiperones se desintegran en un lapso del orden de 10^{-10} secundos. También se desintegran los mesones π. De qué modo las resonancias pueden captarse también en semejantes sistemas lo mostraremos en el ejemplo de la resonancia en el sistema mesón π — hiperón Λ^0.



Si los mesones se bombardean con los mesones K de gran energía, entonces, con frecuencia, se observa la reacción que se desarrolla de acuerdo con el siguiente esquema:

$$K^- + p \rightarrow \Lambda^0 + \pi^+ + \pi^-.$$

El mesón K, al chocar con el protón, engendra el hiperón Λ^0 y dos mesones π.

Al investigar una cantidad bastante grande de estas reacciones, es posible encontrar el número de mesones π^- de energía determinada. Después se puede construir la curva de dependencia del número de mesones π^- respecto a su energía: el llamado espectro energético de los mesones. El carácter de la curva debe depender de cómo transcurre la reacción dada. Supongamos que durante la reacción todas las tres partículas Λ^0, π^+ y π^- se engendran simultáneamente y se fugan en diferentes sentidos independientemente unas de otras. En este caso, la energía inicial del mesón K^- y del protón se redistribuye de diferente manera entre las partículas que nacen. Las leyes de conservación de la energía y del impulso determinan unívocamente sólo el valor máximo posible de la energía del mesón π^-.

La energía es capaz de tomar cualesquiera valores: desde cero hasta el máximo.

Los asuntos tomarán un cariz completamente distinto si el hiperón Λ^0 y el mesón π^+ inmediatamente después de la reacción se comportan como un todo único. Entonces, la energía inicial de las partículas K^- y p se distribuye entre dos partículas, y las leyes de conservación de la energía y el impulso determinan unívocamente el valor de las energías de ambas partículas que se engendran. Hablando de un modo algo simplificado, las leyes de conservación de la energía y el impulso representan en este caso dos ecuaciones con dos energías incógnitas de las partículas engendradas, puesto que el impulso puede expresarse por medio de energía. Ahora bien, durante el nacimiento de tres partículas de una vez tendríamos tres incógnitas y las energías de las partículas no se determinarían de modo unívoco. La curva experimental acusa un sobresalto brusco para la energía determinada del mesón π^-. En consecuencia, en un número grande de casos, todas las tres partículas no nacen simultáneamente. Al principio, se engendran dos y, seguidamente, una de éstas se desintegra:

$$K^- + p \rightarrow \Sigma^{*+} + \pi^- \rightarrow \Lambda^0 + \pi^+ + \pi^-.$$

Σ^{*+} es el sistema intermedio que se comporta como un todo único. Al igual que Δ^{++} ésta se denomina partícula de resonancia. Las leyes de conservación dan la posibilidad de hallar su masa: 1385 millones electronvoltios. Por el ancho del sobresalto de resonancia es posible determinar el tiempo de vida de la resonancia Σ^{*+}. Éste resulta ser aproximadamente el mismo que el de Δ^{++}.

A la par de la resonancia cargada positivamente Σ^{*+} existe también cargada negativamente

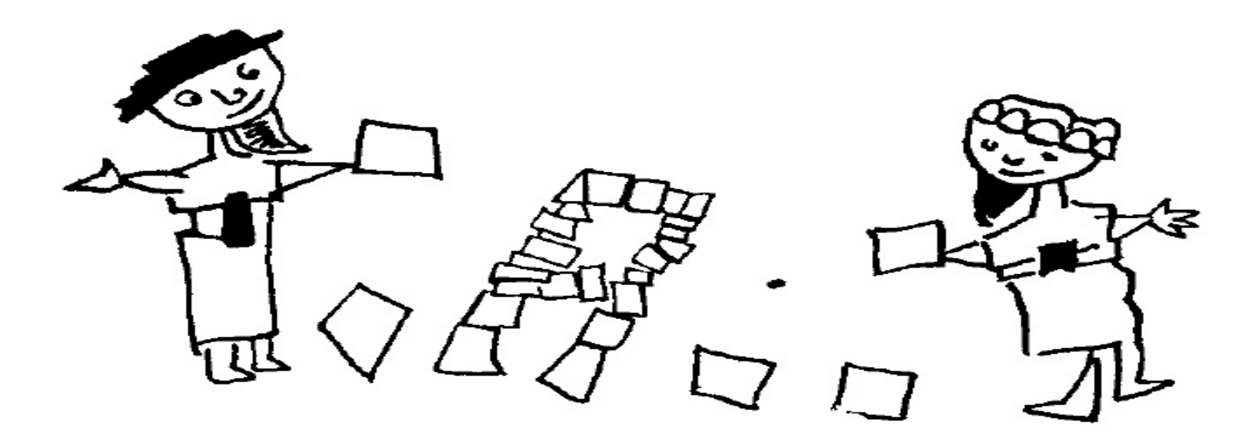
Σ^{*-} y neutra Σ^{*0}. Sus masas son, aproximadamente, iguales.

Valiéndose de método análogo fueron descubiertas otras resonancias. En la actualidad, su número total sobrepasa dos centenas.

2. Sistemática de las partículas elementales

Una partícula elemental es "composición" de todas las demás

El descubrimiento de las resonancias complicó el cuadro del mundo ya de por sí no simple. El problema sobre qué es la partícula elemental adquirió una agudeza todavía mayor. Es que ya con el estado existente de las cosas no se podía afirmar con seguridad que todas las 35 partículas con los tiempos de vida relativamente grandes (algunas lo tenían infinitamente grande) eran elementales. Su número era demasiado grande. Y ahora se añadieron a éstas, además, partículas de resonancia.



Pero la cuestión radicaba no sólo en ello. Actualmente deviene indiscutible que las partículas que, por costumbre, se denominan elementales, poseen, en la realidad, una estructura

extremadamente complicada. Así, por ejemplo, los protones y los neutrones están rodeados por las nubes piónicas. Desde el punto de vista estructural los piones entran en el nucleón. Los mesones π, a su vez, pueden transformarse en el par nucleón—antinucleón. Por consiguiente, las partículas no se pueden distribuir por los cajones, estudiando aisladamente cada una de éstas. Es imposible revelar la imagen de una partícula cualquiera sin tomar en consideración las otras. Cada partícula elemental, según la expresión de Márkov, comienza a figurarse como "composición" de todas las demás. Como resultado se tiene un círculo cerrado: las propiedades de una de las partículas vienen determinadas por todas las demás. La cuestión es: ¿se abre o no en algún lugar este círculo, o sea, existen partículas rudimentarias a partir de las cuales están construidas todas las demás o es que en la naturaleza no se tienen partículas de este tipo?

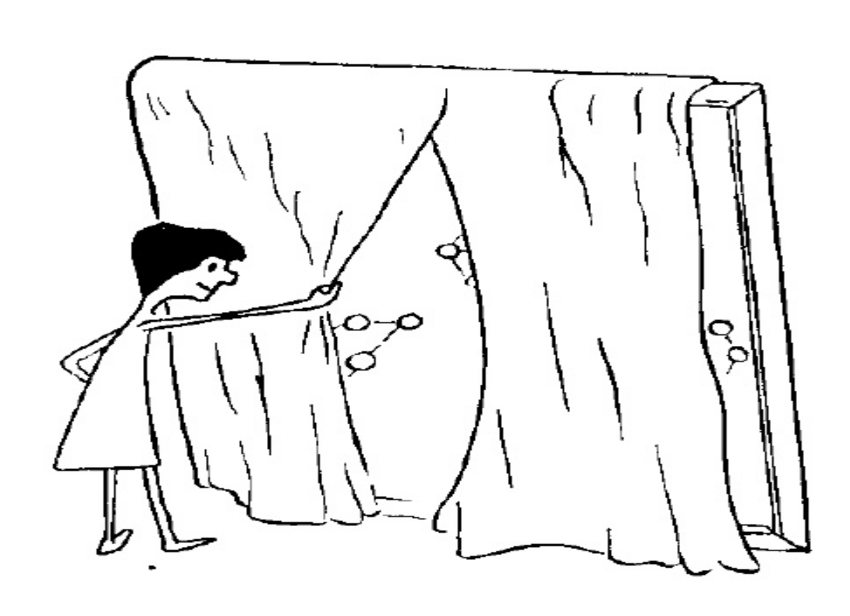
Todavía hace poco no se podía dar una respuesta a esta cuestión. Sin embargo, hoy en día es posible afirmar que el descubrimiento de las resonancias sólo temporalmente complicó el cuadro del mundo. La gran cantidad de resonancias condujo a los científicos, en fin de cuentas, a la siguiente conclusión: la mayor parte de las partículas elementales son compuestas. Más tarde nos referiremos a este tema.

Durante la investigación del problema sobre las resonancias se manifestó, probablemente, con mayor nitidez la necesidad de introducir un enfoque nuevo en los métodos de la descripción teórica que se aplicaban anteriormente.

Destellos de la unidad

Ya en el momento presente el descubrimiento de las resonancias ayudó a ver aquello que hasta

ahora ha quedado oculto a los ojos de los investigadores. Figúrese que tiene ante sí un gran lienzo escondido detrás de una cortina de tela muy tupida. Usted quiere saber qué se encierra tras la misma, pero se siente incapaz de descorrerla toda de una vez. Y he aquí que logra romperla en un lugar, después en otro, de modo que empiezan a distinguirse algunas figuritas. Ahora ya no hay duda de que tiene ante sus ojos un cuadro con numerosos personajes, y no, meramente, un pedazo de lienzo empastado.



Un esfuerzo más, y quedan al descubierto porciones enteras del cuadro. En algunas de éstas se puede advertir un parentesco profundo entre los personajes representados y la unidad de la composición. Otras porciones son tan pequeñas que es difícil comprender qué es lo que vincula sus distintos detalles.

Es mucho más difícil adivinar por los fragmentos fortuitos qué hay de común entre éstos y captar lo íntegro que está representado en el cuadro cuya mayor parte permanece aún oculta.

Mas poco a poco la cortina comienza a caer. Usted se fija, concentrando su atención, en el

cuadro, y se pone de manifiesto el carácter admirablemente íntegro de lo representado: los fragmentos aislados confluyen en un todo único. Más aún, usted hasta puede atinar e imaginar aquello que está pintado en las partes del lienzo todavía inaccesibles a la vista.

El cuadro es múltiple. Hablando con propiedad, tenemos que ver aquí con toda una serie de cuadros los cuales, por su número, sobrepasan el tríptico clásico.

Algo similar, en cierto sentido, ha acontecido en el período más reciente cuando la obra del Gran Maestro —la Naturaleza— el mundo de las partículas elementales, después del descubrimiento de las resonancias se ha presentado ante los científicos en la forma más patente que en cualquier época anterior.

Hermanos gemelos con los trajes eléctricos

Cuando los físicos solamente comenzaron a entablar conocimiento con las partículas elementales, cada una de éstas parecía una personalidad brillante e individual. Pero el número de partículas conocidas aumentaba y éstas, de un modo casi imperceptible, como si fuese por sí mismas, comenzaron a dividirse en grupos, con la particularidad de que en el seno de cada grupo se perfilaron los rasgos de un determinado parentesco.

Se procedió a la clasificación de las partículas.

¿Ateniéndose a qué indicios se puede realizar la sistemática?

Desde el punto de vista histórico, el primer indicio fue la masa. (A todas luces, en este caso una influencia no pequeña la ejerció el ejemplo sorprendente de la clasificación de los elementos de Mendeléiev.) Las partículas se dividieron en

grupos, y en aquel período éstas se denominaron precisamente así: ligeras, medias y pesadas. Sin embargo, este esquema requirió ser precisado. Resultó necesario tomar en consideración el espín y —lo que para nosotros es de especial importancia— el carácter de la interacción. De esta forma nacieron las clases conocidas de partículas: leptones, mesones*, partículas pesadas —bariones— y, finalmente, se añadieron, además, las *resonancias. Ya nos hemos enterado* de esta clasificación, al analizar la tabla de partículas elementales.

Pero he aquí lo curioso. Si esta tabla se mira con mayor atención, no cuesta trabajo advertir entre los mesones y bariones grupos de partículas las cuales, si se permite decir así, solicitan que se formen de ellas unos subgrupos precisos.

Tomemos, por ejemplo, tres mesones: π^+, π^- y π^0. Si no fuera por sus cargas, ¿cómo se podían distinguir? Todos ellos se comportan de un modo absolutamente idéntico respecto a las interacciones fuertes. Tienen igual espín. Incluso la insignificante diferencia entre sus masas tiene origen electromagnético: si las cargas eléctricas desapareciesen esto bastaría para que las masas se hicieran iguales. ¡Cómo puede uno contenerse y no decir en este caso que los tres mesones π, en esencia, no son partículas diferentes, sino una sola, mas en distintos estados de carga!

Los mesones π no representan el único ejemplo que conocemos de hermanos gemelos que sólo se diferencian por su atavío eléctrico. Como, probablemente, se acordará el lector, la conversación sobre las fuerzas nucleares nos llevó

---

* El mesón μ, debido a su masa grande, indujo a los *científicos en un error, de modo que, al principio,* lo incluyeron entre los mesones. Actualmente queda claro que, por su naturaleza, es un leptón.

a la misma conclusión respecto al protón y el neutrón. En general, se puede decir que éste no es un caso singular, sino una regla. Y no conviene pasar sin detenerse en ésta y sin prestar atención.

Vamos a trabar un conocimiento más cercano con los multipletes de carga (este nombre lo recibieron los grupos de partículas que se diferencian tan sólo por los estados de carga). Además del triplete (multiplete constituido por tres partículas) de mesones π existe también el triplete de hiperones Σ. Los mesones K, como el protón con el neutrón, forman un doblete de carga (2 partículas), y el hiperón Λ^0 forma un singulete, o sea, es representante único de un multiplete de carga especial.

También las resonancias resultaron ser gemelos con los "trajes eléctricos". Así, por ejemplo, a la par de la resonancia Δ^{++} que se engendra durante la dispersión de los mesones π^+ en los protones, existen también resonancias pion-nucleónicas Δ^+, Δ^0 y Δ^- que se distinguen solamente por las cargas eléctricas. Estas cargas son iguales a $2e$, e, 0 y $-e$, respectivamente.

La pertenencia a un multiplete de carga determinado y el número de partículas en este multiplete es una marca importantísima en el certificado de la partícula elemental. Sin embargo, resulta que es mucho más conveniente hablar no del número de partículas en un multiplete, sino del llamado espín isotópico y de las proyecciones de este espín.

¿Qué es el espín isotópico?

El propio término "espín isotópico" representa una combinación de conceptos cada uno de los cuales ya hemos encontrado por separado. Como recordará el lector, se denominan isótopos ele-

mentos gemelos que no se distinguen por sus propiedades químicas, pero pueden tener "parámetros" físicos algo diferentes, por ejemplo, la masa.

En la tabla de Mendeléiev todos los isótopos ocupan una misma casilla y llevan el mismo nombre. Decimos, por ejemplo, que helio-tres (^{3} He) y helio-cuatro (^{4} He) no son elementos diferentes, sino, si se quiere, diferentes estados de un mismo elemento. Análogamente a lo expuesto, todas las partículas miembros de una familia del multiplete de carga también se consideran como una partícula, sólo que ésta se encuentra en diferentes estados.

Bueno, ¿y a qué viene aquí el "espín"? Si se tiene en cuenta el espín que se puede definir como "momento propio de rotación", entonces, efectivamente, no tiene nada que ver con el tema. Sin embargo, no hay nada nuevo ni sorprendente si una misma palabra se emplea en acepciones completamente distintas. ¿Acaso son pocos los ejemplos? Tomemos la palabra "punto". Designa la unidad que se adopta como base en la calificación de algunos ejercicios y, al mismo tiempo, es la denominación de un signo ortográfico, etc. La palabra "grado", con pleno éxito, "trabaja" tanto al hablar sobre la temperatura, como en la medición de los ángulos. Pero los ángulos se pueden medir también en minutos y segundos los cuales, a su vez, sirven de medida para otra magnitud completamente distinta: el tiempo. Por lo demás, este último ejemplo merece que se detenga en él. La saetilla horaria se desplaza por la esfera. Si una revolución completa corresponde a una hora, entonces, la variación del ángulo por un minuto (¡un minuto de tiempo!) es igual, exactamente, a un minuto "angular". Aquí tenemos un paralelismo completo, y éste, sin duda alguna, está relacionado con la elección

del modelo mecánico que se aplica para medir el tiempo (en el caso de tomar, por ejemplo, un reloj de arena, no obtendríamos nada semejante).

Ahora pasemos a elegir otro "modelo mecánico": una partícula con el espín determinado. Sea que este espín es igual, por ejemplo, a $^1/_2$ (una vez más recordemos al lector que todos se toman en unidades $\hbar$). Semejante partícula, como se acordará, puede tener tan sólo dos orientaciones: su espín ya sea que se dispone paralelamente al impulso, o bien, es antiparalelo. Dos orientaciones significan dos estados posibles. Y si el espín es igual a cero, entonces, se sobreentiende, "por mucho que se le den vueltas" a la partícula, nada cambiará, por consiguiente, aquí tenemos un solo estado.

¿Y el espín igual a 1? El cálculo cuántico evidencia que en este caso son posibles tres estados diferentes. Si el espín de la partícula es de $^3/_2$, existen cuatro estados semajantes, etc. En el caso general, el espín igual a n asegura la posibilidad de $2n+1$ de diferentes estados "intrínsecos", como éstos se llaman. Y ahora llegó el momento de acordarse de nuestras "familias" de partículas. Recuerden que volvemos a considerar a los "miembros de cada una de estas familias" como una partícula, pero con distintos estados "intrínsecos". Y el número de estos estados varía de "familia" a "familia". Los más pobres (el hiperón Λ^0) sólo lo tienen uno. (¡Vaya que viene a la memoria el espín cero!) Otras partículas (los nucleones) los tienen dos. Una vez más tenemos plena analogía con el caso del espín $^1/_2$. Los mesones π (π^+, π^0 y π^-) los tienen tres, como para el espín igual a a unidad, etc. Ahora el lector se da cuenta de que nuestro "modelo mecánico" se justifica completamente, y, en consecuencia, existe pleno fundamento para hablar sobre el espín isotópico,

Pero nosotros podemos hacer un paso más: acuérdense de que mientras el valor del espín (de nuevo nos referimos al "espín mecánico") indica el número de estados intrínsecos posibles, prefijar concretamente cada uno de estos estados es posible, por ejemplo, señalando cómo está orientado el espín (respecto al impulso o, en general, respecto a cualquier eje; por tradición, se suele elegir el eje z); lo mismo se puede expresar también en la siguiente forma: el estado viene determinado por la proyección del espín sobre el eje z. No hay nada que nos impida proceder de modo análogo también en el caso del espín isotópico, o sea, asignar a cada uno de los miembros de nuestras "familias isospínicas" un valor determinado de la "proyección del espín isotópico sobre el eje z". Por supuesto, se podría, simplemente, señalar la carga, pues de lo anterior se infiere que es esta proyección la que determina la carga de la partícula perteneciente a la familia. Sin embargo, resulta que precisamente la proyección del espín isotópico es la magnitud más conveniente para el aparato matemático de la teoría.

El *quid* de la cuestión, sin embargo, no radica única y solamente en la conveniencia. El espín isotópico posee una propiedad de trascendental importancia, propiedad que, de por sí, lo promueve al puesto de honor: el espín isotópico (isospín) se conserva durante las interacciones fuertes. Este hecho significa que en cualesquiera transformaciones debidas a las interacciones fuertes el valor total del isospín de todas las partículas antes de la transformación es el mismo que el de las partículas formadas después de la transformación.

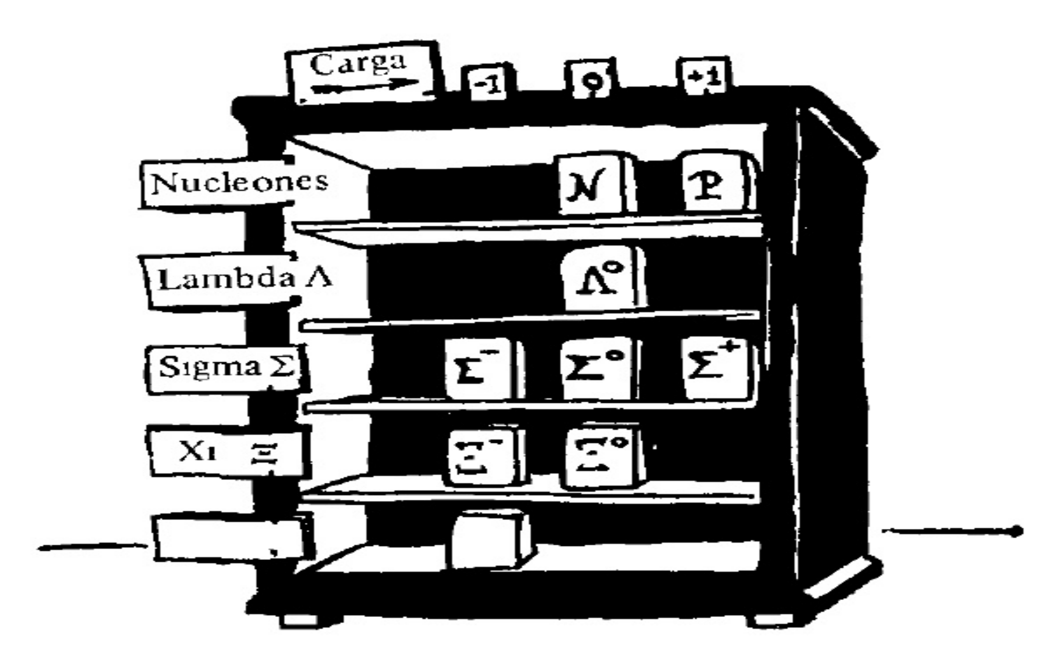
Partícula	Número de partículas en el multiplete	Espín isotópico	Carga de la partícula	Proyección del espín isotópico
Λ^0	0	0	0	0
p n	2	1/2	$+e$ 0	+1/2 —1/2
π^+ π^0 π^-	3	1	$+e$ 0 $-e$	+1 0 —1
K^+ K^0	2	1/2	$+e$ 0	+1/2 —1/2
Σ^+ Σ^0 Σ^-	3	1	$+e$ 0 $-e$	+1 0 —1
Δ^{++} Δ^+ Δ^0 Δ^-	4	3/2	$+2e$ $+e$ 0 $-e$	+3/2 +1/2 —1/2 —3/2

Así, por ejemplo, en la reacción

$$p+\pi^- \rightarrow n+\pi^0$$

el espín isotópico de las partículas iniciales es igual a 3/2 (1/2 para el protón y 1 para el mesón π^-). En el estado final las partículas tienen el isospín total también igual a 3/2 (1/2 para el neutrón y 1 para el mesón π^0).

La ley de conservación del espín isotópico durante las interacciones fuertes es la expresión concentrada de la independencia de dichas interacciones respecto a la carga eléctrica. Es la



única ley de conservación que se cumple solamente para las interacciones fuertes.

En la tabla de la pág. 523 se insertan algunos ejemplos de correspondencia entre el número de partículas en el multiplete de carga y las cargas de las partículas, por una parte, y el espín isotópico a la par de sus proyecciones, por otra.

Por lo demás, la demostración siempre es más patente que el relato. Figurémonos que realizamos la sistemática de las partículas, por ejemplo, de bariones, es decir, las distribuimos por los anaqueles no en el sentido figurado, sino en el más literal de esta palabra. Dibujaremos incluso estos anaqueles, uno para cada multiplete de carga, concediendo sitios a las partículas en estricta correspondencia con sus cargas.

Ahora, cuando las partículas están distribuidas por los anaqueles, estamos en condiciones de admirar la obra de nuestras manos. Pero he aquí una cosa extraña: la disposición resultó ser, no se sabe por qué razón, no simétrica. Esta asimetría se puede describir cuantitativamente; es suficiente determinar la carga media en cada anaquel. Para los nucleones —que son nuestros

conocidos más viejos de la familia de los bariones— esta carga media del multiplete es igual a $+1/2$. Precisamente con este valor vamos a comparar las cargas medias de todos los demás multipletes bariónicos (para obtener valores enteros, y no fraccionarios, es conveniente tomar la diferencia duplicada de las cargas medias de los multipletes). He aquí, por ejemplo, las partículas Ξ. Su carga media es igual a $-1/2$. La diferencia duplicada de esta carga y de la carga media nucleónica es de -2. Para el triplete Σ, por el mismo método, obtenemos el valor de -1, al igual que para Λ^0. No es difícil realizar cálculos análogos también para los mesones, tomando como "patrón" (es decir, considerando que para éstos el desplazamiento es igual a cero) los mesones π. ¿Fíjense, si las cifras obtenidas les hacen recordar algo? ¡Claro que sí! No es otra cosa que los valores de las extrañezas las cuales desempeñaban un papel tan importante en el relato sobre las interacciones débiles.

¡Un hecho muy curioso! Desde un nuevo punto de vista, interesándonos por la sistemática de las partículas (pues ahora no pensamos en ningunas desintegraciones u otras transformaciones mutuas) llegamos una vez más a la necesidad de introducir en nuestro examen la extrañeza.

Ladrillitos en los ladrillitos

Al plantearnos el problema de poner orden entre la colección de las partículas que cada vez se convierte en más numerosa (y, para conseguirlo, haciéndonos incluso con unas alacenas), destacamos entre otros cuatro características: espín, masa, carga y extrañeza. El espín determina en cuál de las alacenas —la bariónica o la mesónica— debe colocarse la partícula (los leptones no los examinaremos) y las demás

magnitudes indican el número del anaquel correspondiente y el sitio en éste.

¡Todo está arreglado metódica y puntualmente, el orden está puesto y se tiene ya la sistemática! Mas, ¿qué provecho se puede sacar de ésta? ¿Presenta por lo menos algún sentido físico? ¿Se han elegido acertadamente las características sobre cuya base se ha realizado la clasificación? Figúrense que nos dedicaríamos no a la clasificación de partículas, sino a la sistemática en la biología, tomando por base, digamos, el peso del animal. En este caso podría ocurrir que los parientes más cercanos del hombre fuesen, por ejemplo, el cocodrilo y la puerca. Por supuesto, no se trata de hasta qué punto lisonjera resulta tal cosa para nosotros los hombres; no, la sistemática de esta índole meramente no contribuye a la profundización de nuestra comprensión del reino animal. Así, pues, se pregunta: ¿es buena o no nuestra clasificación de partículas elementales?

En primer término, cabe señalar que todas las características que hemos elegido son magnitudes que no varían durante las interacciones fuertes. Para cualesquiera transformaciones provocadas por estas interacciones la carga eléctrica de los "productos" iniciales y de aquellos que se forman en estado final permanece igual. Lo mismo se puede decir acerca de la extrañeza y el espín. (El análisis de la situación con la masa es más complicado y aquí no nos referiremos a este problema.)

Puede formarse la impresión que existe cierto "juego" de portadores materiales de la carga, de la extrañeza y el espín, ciertas subpartículas las cuales, aglutinándose en combinaciones determinadas, forman bariones y mesones, con la particularidad de que en todas las transformaciones estas subpartículas, de por sí, no de-

saparecen ni se engendran, sino que, solamente, pasan de unas combinaciones a otras. Si se da crédito a esta impresión, la conservación de la carga o de la extrañeza parece tan poco asombrosa como la conservación del número de piezas en un mecano infantil, independientemente de si con estas piezas se ha construido una locomotora o un molino.

Las partículas elementales, ya hace mucho, llevan el nombre poético de ladrillitos de la materia. Pero, si existen subpartículas, esto quiere decir que ¿estos ladrillitos constan de otros, "todavía más elementales"? Semejante idea es tan seductora que no se puede negar el placer de discutirla más pormenorizadamente.

¿Los quarks?

Notemos, ante todo, que nuestras subpartículas deben tener el espín igual a $^1/_2$. Efectivamente, de las mitades pueden formarse tanto espines enteros como semienteros, lo que no seríamos capaces de hacer en el caso de disponer tan sólo de "piezas" con el espín igual a cero, a la unidad o a cualquier otro número entero.

Bueno, ¿y qué se puede decir de la carga, la masa y la extrañeza?

Y es aquí, precisamente, donde nos acecha una sorpresa. Resultó que obtenemos un cuadro más íntegro si, renunciando a la costumbre sólidamente arraigada, atribuimos a nuestros ladrillitos en los ladrillitos unas cargas no iguales a números enteros (o sea, múltiplos de la carga electrónica), sino fraccionarias.

¡Cargas fraccionarias! Aún en tiempos muy recientes esta idea hubiera parecido demente. Sin embargo, precisamente tres partículas de este tipo introdujo para el examen Gell-Mann. Y también fue él quien les dio el nombre de "quarks".

Y la culpa... —¿quién, piensa usted, la tiene?— la tiene Finnegan, el protagonista de una novela del escritor inglés Joyce. A. Finnegan, o a su doble que lo "desalojó de la vida", se le imagina que él es el rey Marco de la leyenda medieval a quien su sobrino Tristán raptó la esposa Isolda. El rey Marco la persigue en su barco, sobre él se agitan gaviotas (las cuales, a propósito, puede ser que, en general, no son gaviotas, sino jueces) y gritan con rabia: "Tres quarks al señor Marco", resonando cada vez más fuerte ese misterioso y horripilante grito suyo: "Tres quarks, tres quarks, tres quarks". Resumiendo, el término "quarks" "traducido" al lenguaje humano normal debe significar algo como "dementes", "inconcebibles", "terribles", "salvajes"; el lector, sin vacilar, puede proseguir la lista de sinónimos.

¿Cuántos quarks, entonces, se deben introducir? Se sobreentiende, se quisiera que su cantidad fuese la mínima posible. Resulta que este mínimo indispensable consiste en tres quarks. En las publicaciones, con frecuencia, se designaban con letras minúsculas p, n y λ* (no confúndense con los símbolos del protón, neutrón y de la partícula lambda que se designan con p, n y Λ, respectivamente).

Como ya convenimos, los espines de todos los quarks los tomemos iguales a $^1/_2$, mientras que las demás propiedades es cómodo representar en forma de la siguiente tabla:

Símbolo del quark	Carga eléctrica	Extrañeza	Carga bariónica
p	+2/3	0	1/3
n	—1/3	0	1/3
λ	—1/3	—1	1/3

* Actualmente, con frecuencia, en lugar de p, n y λ se emplean las designaciones u, d y s.

Intentemos ahora combinar los quarks de un modo tal que se obtengan las partículas que conocemos. Empecemos, digamos, por el protón p. La extrañeza del protón es igual a 0, por consiguiente, tenemos que limitarnos al juego de *p* y *n*. En conjunto, en p deben incluirse tres quarks para que el número bariónico total resulte igual a la unidad. Si, además, se toma en consideración que la carga de p es igual a +1, llegamos al juego: *ppn*.

Es necesario cuidar de que el espín total sea igual a 1/2. Este objetivo se puede conseguir si se admite que los espines de dos quarks *p* son paralelos, mientras que el espín de *n* es antiparalelo a éstos (o bien, al "eje Z", como dicen los físicos, o sea, a cierta dirección elegida en el espacio).

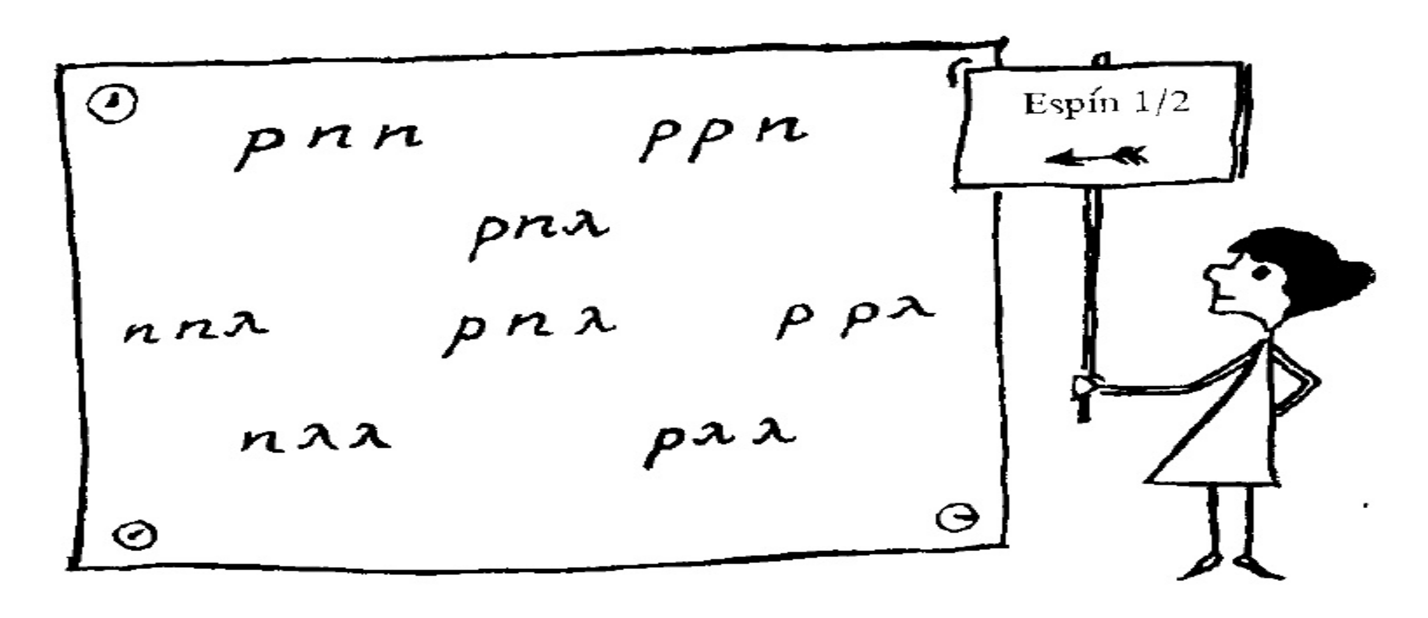
Recurriendo a los símbolos, esto puede anotarse de la siguiente manera:

$$\mathrm{p} = p\uparrow p\uparrow n\downarrow .$$

La flecha a la derecha del símbolo designa la dirección de su espín. Creemos que en este ejemplo se esclareció la receta de la formación de partículas a partir de los quarks y no deja la impresión de ser compleja. Procuremos, entonces, combinar las tríadas de quarks, advirtiendo qué dará nuestro intento.

Al principio, convengamos en examinar las combinaciones cuyo espín es igual a 1/2. Esto significa que los espines de todos los quarks no pueden tener la misma orientación. Un análisis más fino basado en el principio de exclusión de Pauli, del que ya hemos hecho mención en este libro, demuestra que no todas las combinaciones de los espines son "permitidas". Por ejemplo, si el espín total es igual a $^1/_2$, deben excluirse del examen las combinaciones de tres quarks idénticos. Existe también una serie de otros momen-

tos sutiles que no vamos a sacar a colación. Simplemente, escribamos todas las combinaciones "permitidas" disponiéndolas en series. Sea que dentro de cada serie la carga eléctrica aumente de izquierda a derecha, mientras que la extrañeza permanezca la misma en cada serie, disminuyendo en una unidad durante la transición de una serie a otra dispuesta debajo de la primera. Obtendremos la siguiente tabla:

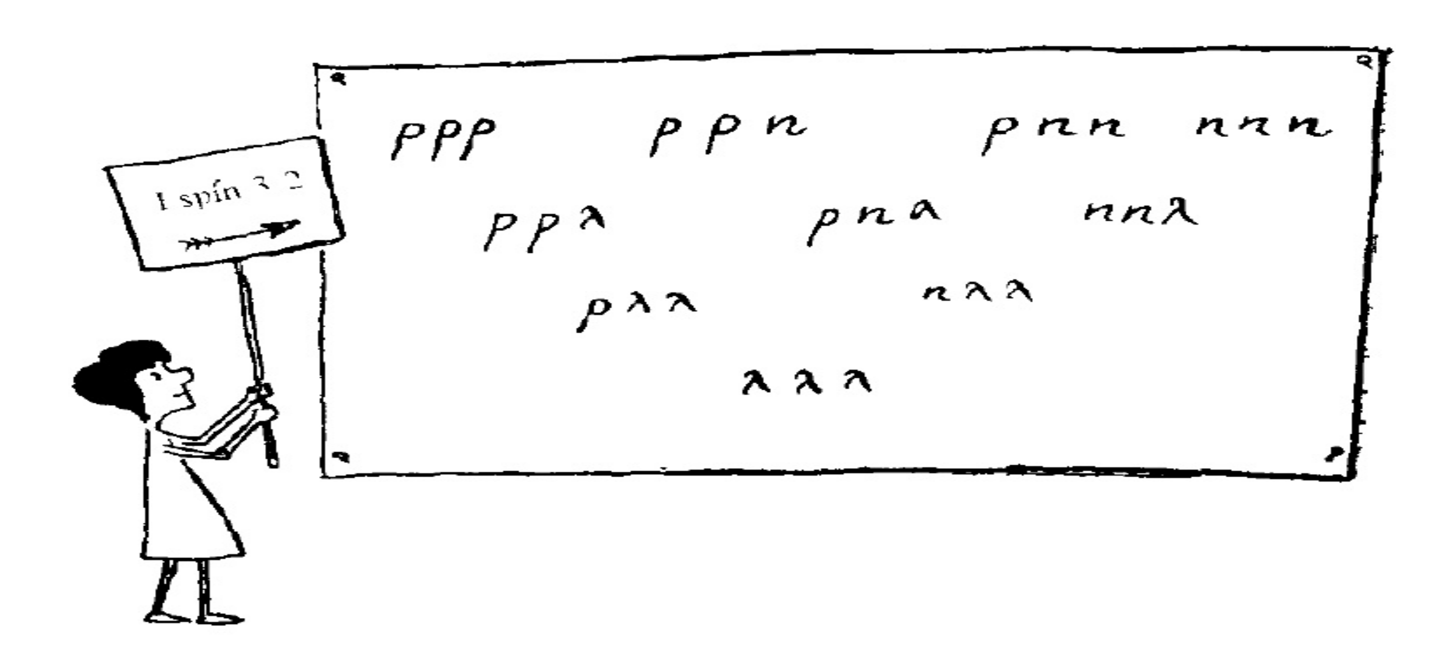


Ahora procuremos poner en correspondencia a estas tríadas las partículas. Ya tenemos conocimiento de la combinación *ppn*: es el protón. Es fácil ver que al neutrón le corresponde *pnn*. Por consiguiente, la primera línea es el doblete nucleónico. El singulete de carga *pnλ* puede ponerse en correspondencia a la partícula Λ^0; la tercera línea nos proporciona el triplete Σ^-, Σ^0, Σ^+, y, finalmente, en la última línea se ubicaron las combinaciones de los quarks que por los valores de la extrañeza y las cargas eléctricas corresponden al doblete Ξ*.

* El hecho de que hemos obtenido dos (¡diferentes!) combinaciones de *pnλ* está relacionado con la posibilidad de distintas orientaciones de los espines en esta

Así, pues, tenemos un resultado y, además, ¡un resultado bueno! Hemos construido ya el llamado octeto bariónico, un supermultiplete que unifica todos los bariones en un grupo.

Ahora prosigamos nuestro sugestivo proceso de combinación que es algo como una variante de rompecabezas. Elijamos ahora las tríadas de los quarks con el espín total igual a $^3/_2$. Y otra vez, ateniéndonos a las mismas reglas que en el caso anterior, construiremos la tabla:

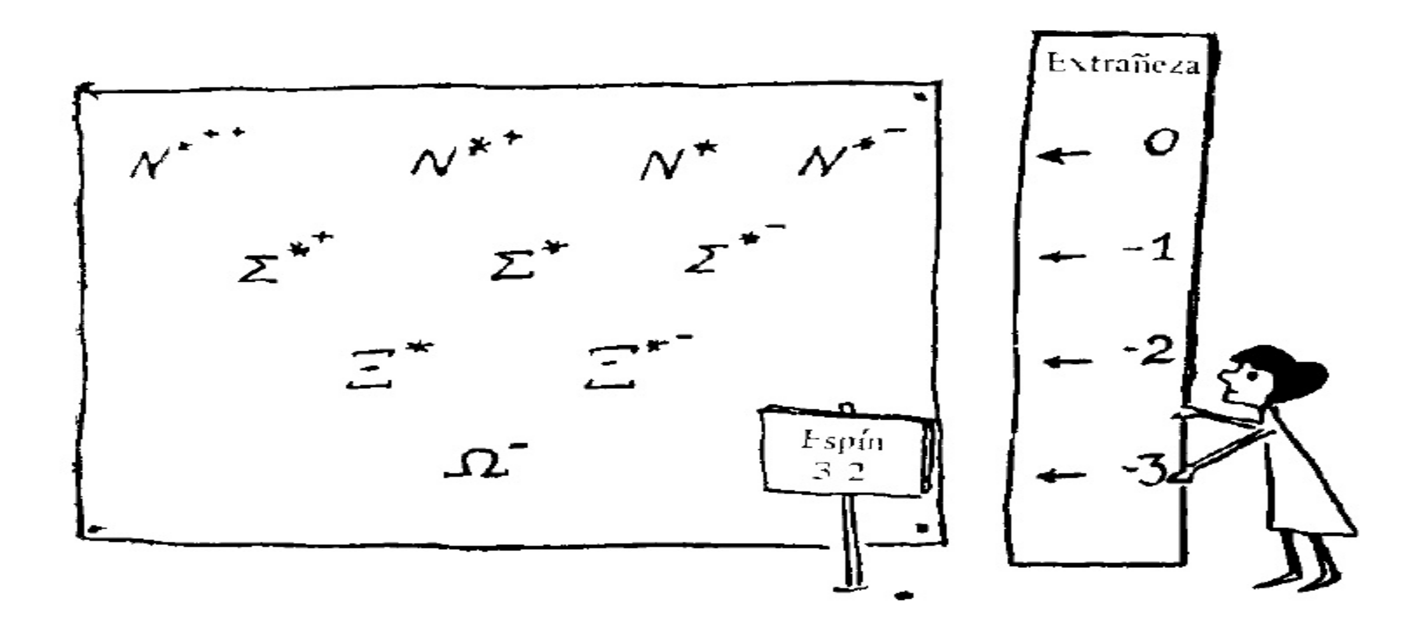


---

tríada. El principio de exclusión de Pauli prohíbe a dos partículas de la misma especie encontrarse en estados iguales. Sin embargo, en el caso dado, todos los quarks son diferentes; en consecuencia, el principio de exclusión de Pauli no impone prohibición alguna.

Elijamos como la dirección del "eje Z" la dirección p. Esto nos dará la posibilidad de dibujar junto al primero, digamos, símbolo de nuestra tríada la flecha orientada hacia arriba: $p\uparrow$. Nos queda analizar todas las posibles combinaciones que dan el espín total igual a 1/2. Está completamente claro que tales combinaciones son nada más dos: $p\uparrow n\uparrow \lambda\downarrow$ y $p\uparrow n\downarrow \lambda\uparrow$. Lo expuesto explica, precisamente, por qué en nuestra tabla $pn\lambda$ figuró dos veces.

La primera impresión que deja esta tabla es que hemos construido partículas que ni siquiera existen en la naturaleza. Por ejemplo, *ppp*, ¿qué partícula es ésta? Su carga eléctrica debe ser igual a $+2$, entre tanto, ni la carga del protón, ni la de Σ, ni la de Ξ superan una unidad. ¿Y las resonancias? Nos hemos olvidado de las resonancias, y, sin embargo, éstas también deben incluirse en el esquema general de clasificación. Entre las resonancias hay una partícula necesaria: es el conocido primogénito de la familia de las resonancias Δ^{++}. Para dicha partícula se encontró lugar en nuestra sistemática. También se encontrará lugar para otras resonancias. Sin palabras superfluas escribamos la tabla correspondiente:



Un encuentro presagiado

Todas las cosas en esta tabla las conocemos ya bastante bien. Los asteriscos indican que tenemos que ver con las resonancias que son estados de excitación de las partículas con los símbolos

correspondientes; las crucecitas o rayas puestas al lado del asterisco determinan la carga eléctrica. Sin embargo, en la tabla aparece algo nuevo: el símbolo Ω^-. Anteriormente no lo hemos encontrado. ¿Qué significa esto? Pero no solamente nosotros no nos hemos encontrado antes con esta partícula. Únicamente los teóricos entusiastas, con firme confianza en la nueva sistemática, no se cansaban en repetir: tal partícula debe existir, hay que buscarla. Llegaron incluso a describir detalladamente la misma: debía tener la carga —1, la extrañeza —3, el número bariónico +1 y el espín igual a $^3/_2$. Si esto fuese poco, hasta su masa se predijo teóricamente. ¿De qué modo? Muy simple (*a posteriori*, todo siempre parece muy simple).

Si, al echar una mirada a la tabla de resonancias, copiamos de la misma las masas, no es difícil advertir que estas masas en nuestra tabla resultan ser tanto mayores cuanto más bajo se encuentra la serie. Al mismo tiempo, la transición a cada serie siguiente viene acompañada con la adición de un quark λ. En la serie superior λ está ausente, en la siguiente serie tenemos un quark λ, más abajo vienen dos λ y, finalmente, Ω^- consta de tres quarks λ. Al comparar el aumento de la masa con el del número de quarks, no es difícil sacar la conclusión que se cae de su peso: los quarks p y n (les asignaremos masas idénticas) son más ligeros que el quark λ. Hasta es posible calcular aproximadamente cuánto lo son. Es suficiente comparar las masas de las resonancias en las series vecinas. La diferencia obtenida equivale, aproximadamente, a 0,16 de la masa del nucléon (o, calculando en unidades energéticas adoptadas hoy en día, es igual a 146 MeV). De este modo, Ω^- debe tener una masa que supere en 146 MeV la de Ξ^*. Consultemos de nuevo la tabla. La masa de Ξ^* es igual a

1530 MeV. Por consiguiente, la masa de Ω^- debe ser de 1676 MeV. Éste fue el pronóstico de los teóricos.

¡Y he aquí que el 31 de enero de 1964 esta partícula fue detectada por vía experimental! En el laboratorio de Brookhaven de EE.UU. se llevaba a cabo la investigación de las colisiones de las partículas K^- con los protones. La partícula Ω^- fue descubierta en la reacción

$$K^- + p \rightarrow \Omega^- + K^+ + K^0.$$

Pasados, aproximadamente 10^{-8} segundos después de su nacimiento Ω^- se desintegra por el esquema: $\Omega^- \rightarrow \Xi^0 + \pi^-$. El tiempo de vida relativamente grande está relacionado con el hecho de que la desintegración por "canales fuertes", es decir, condicionada por las interacciones fuertes, viene prohibida por la conservación de la extrañeza; y la variación de la extrañeza, como ya hemos señalado, es posible solamente durante las integraciones debidas a la interacción débil.

El descubrimiento de la partícula Ω^- y la sorprendente exactitud con que se confirmaron las predicciones de la teoría, por supuesto, no podían dejar de producir una impresión formidable. Si anteriormente a este evento, la sistemática se consideró muy a menudo como un juego de fantasía, un juego bello e ingenioso, pero lejos de ser convincente, con el descubrimiento de Ω^- los sentimientos de los físicos experimentaron un brusco cambio. En la atmósfera comenzó a percibirse claramente la proximidad de grandes acontecimientos.

Los éxitos se multiplican...

La nueva clasificación traía un éxito tras otro. Los mesones y las resonancias bosónicas, de un modo natural y espontáneo, se inscribieron en

el sistema general. Los bosones son partículas con el espín entero. En consecuencia, estas partículas deben aglutinarse a partir de un número par de quarks. Más exactamente, a partir de un número igual de quarks y antiquarks* puesto que ahora queremos obtener partículas con carga bariónica igual a cero. (Para todos los antiquarks la carga bariónica, análogamente a los demás números cuánticos, es opuesta por el signo a la de los quarks correspondientes.)

Las combinaciones más simples de esta especie tienen la forma $p\overline{p}$, $n\overline{n}$, $\lambda\overline{\lambda}$, $p\overline{n}$, $\overline{p}\lambda$, etc. Si los espines están orientados antiparalelamente, se obtienen partículas de espín cero. Por ejemplo, el mesón π^+ debe considerarse como la combinación $p\uparrow\overline{n}.\downarrow$ En efecto, la carga resulta igual a

$$\frac{2}{3}+\frac{1}{3}=1,$$

y la extrañeza es igual a cero, como se necesita, precisamente, para el mesón π^+. ¿Quiere usted construir el mesón extraño, por ejemplo K^+? Bueno, esto significa que hace falta tomar la combinación $p\overline{\lambda}$. La carga eléctrica de esta combinación es igual a una unidad y la extrañeza también es igual a $+1$. Para obtener bosones de espín entero es preciso elegir parejas quarks—antiquarks con los espines orientados en la misma dirección.

Pensamos que no vale la pena escribir todo aquello detalladamente. Esperamos que el lector nos dé crédito si le decimos que los mesones y las resonancias bosónicas, al formar sus supermultipletes, encajan tan acertadamente en los marcos de la sistemática como los bariones.

---

* Los antiquarks se designan con los mismos símbolos, pero con una raya por encima.

Sin embargo, tampoco con lo expuesto se agota el éxito de la teoría. Al suponer que los quarks poseen momentos magnéticos proporcionales a sus cargas, se puede hallar la relación entre los momentos magnéticos de las partículas que se componen de estos quarks, por ejemplo, se puede hallar la relación entre los momentos magnéticos del protón y del neutrón. Ésta resulta igual a $^3/_2$. Y la experiencia nos da el valor de 1,46. Una vez más no se puede dejar de reconocer que la coincidencia es brillante.

...Y las dificultades se perfilan con mayor claridad

En aquel preciso instante en que nuestro relato sobre los quarks llegó, al parecer, a su apogeo, en que el lector, probablemente, ya comenzó a sentir confianza y simpatía a los mismos, emergió de pronto y, además, en el título la palabra "dificultades". ¡Un éxito tan formidable, hasta se puede decir un triunfo, un vaticinio tan brillante de una nueva partícula —incluso si hacemos caso omiso de la ordenación de las partículas ya conocidas—, una explicación tan elegante de las propiedades de estas partículas, por ejemplo, de la relación entre sus momentos magnéticos, y, de súbito, "dificultades"!

¿Qué dificultades? ¿En qué consisten?

Cuando a Gell-Mann preguntaron si existen los quarks (recordemos que fue precisamente él quien, en grado considerable, los introdujo en la ciencia), su respuesta fue: "¿Quién sabe...?" Desde entonces pasó mucho tiempo. La seguridad de que los quarks existen aumenta de año en año. Los "ladrillitos en los ladrillitos" ya no se consideran sólo como un modelo palmario conveniente para la sistemática de las partículas de interacción fuerte.

Los partidarios de los quarks buscan la confirmación de sus concepciones incluso en trazar paralelos históricos. Hacen alusión, por ejemplo, a la teoría molecular la cual había sido formulada antes de que aparecieran las pruebas directas de existencia de las moléculas. En aquel período se hubiera podido decir que los fenómenos transcurren de tal modo "como si las moléculas hubiesen existido". Pero ahora ya sabemos que las moléculas existen realmente.

Por cierto, podemos contestar a este paralelo con otros no menos aleccionadores. Maxwell construyó la electrodinámica partiendo del concepto del éter lucífero, mas ahora sabemos que este éter no existe. Fourier dedujo las ecuaciones de la conductibilidad térmica que se utilizan hasta la fecha convencido de que el portador de calor es cierto fluido omnipenetrante, sin embargo, hoy en día casi no hay persona quien se acuerde del calórico, a no ser que los historiadores de las ciencias naturales.

Los paralelos históricos representan un problema muy delicado.

Sin embargo, preguntará el lector, ¿qué sentido tiene recurrir a argumentos confusos y poco convincentes en lugar de dirigirse sencillamente a la experiencia? ¿Y si se hará un intento de descubrir los quarks experimentalmente? Tanto más que los quarks, a raíz del carácter fraccionario de su carga, tienen que ser estables en estado libre, destacándose notoriamente sobre el fondo de otras partículas.

La búsqueda de los quarks se llevó a cabo durante muchos años. Aparentemente, lo más sencillo sería no buscarlos, sino crear, efectuando colisiones de partículas aceleradas en los aceleradores. ¿Acaso puede haber una cosa más simple? Si todas las partículas están constituidas por los quarks, es suficiente tomar cualquiera

de estas partículas, descargar sobre ésta con alguna cosa un golpe de lo más fuerte, y los fragmentos-quarks, como disparados, saltarán, inmediatamente, por todos los lados.

Si se juzga por la idea, todo, por supuesto, es simple. Sin embargo, todavía jamás ha habido persona que consiguiera hacerlo. Es posible que por ahora no dispongamos aún de aceleradores bastante potentes.

Pero de tales aceleradores dispone la naturaleza. Entre las partículas cósmicas que llegan volando a las fronteras de la atmósfera terrestre, aunque no muy frecuentemente, aparecen unas con energías verdaderamente cósmicas. Al chocar con los núcleos de los átomos que entran en la composición de la atmósfera, estas partículas—atletas deberían engendrar quarks libres. Lo único que queda es buscar y encontrar estos quarks, cosa que debe simplificarse considerablemente en virtud del carácter fraccionario de su carga.

Así, pues, el programa de acciones resulta claro y sencillo. Tanto más desalienta su rotundo fracaso. Hasta ahora nadie y en ningún lugar ha conseguido hallar los quarks.

El aroma y el color de los quarks

Al parecer, los físicos deberían darse por vencidos... ¡Nada semejante! El entusiasmo de aquellos quienes tenían fe en los quarks no disminuyó. Más aún, en vez de tres quarks comenzaron a someter al examen doce, y algunos, todavía mayor cantidad de éstos. Y hasta en las dificultades del modelo de los quarks (que explícitamente, desalientan) los teóricos advirtieron la indicación del camino que se podía trazar para seguir las búsquedas.

Sin embargo, procuremos contarlo por orden.

En primer término, ¿por qué son pocos los tres quarks?

Ésta es una pregunta bastante simple. Los lectores atentos, a todas luces, ya se fijaron en que, al elegir los diferentes juegos de los quarks y "combinando" de este modo las distintas partículas, nosotros, al parecer, nos hemos olvidado del principio de exclusión de Pauli. En efecto, en el protón, por ejemplo, nos encontramos con dos quarks *p* con la misma dirección del espín, a pesar de que estos quarks son fermiones y, por lo tanto, sus estados en el sistema deben diferenciarse en algo. Y ésta no es la única "libertad" tomada por nosotros; además, esta "libertad" es forzosa. Al tratar de "construir" aunque sea la partícula Ω^- a partir de tres quarks λ, meramente no podemos evitar la coincidencia de los espines.

¿Puede ser que hay que renunciar al principio de exclusión de Pauli? No, es difícil decidirse para tal cosa, ya que hasta el momento nada y nunca nos haya dado pretexto para ponerlo en tela de juicio.

Existe un camino mucho más sencillo y natural. Es evidente que para evitar las dificultades mencionadas basta "marcar" los quarks. En otras palabras, los quarks deben tener cierto número cuántico interno complementario, por el cual éstos, idénticos en todos los demás aspectos, se diferenciarán, precisamente.

Cuando este número cuántico fue introducido, le dieron el nombre de "color", que es muy expresivo, aunque, claro está, no guarda relación alguna con el verdadero color. Se propuso examinar los tres quarks en tres "variantes de color", digamos, en "azul", "rojo" y "amarillo". Por si esto fuese poco, a los tres quarks anteriores (y tomando en consideración el color, a los nueve) se añadió uno más, también con tres

colores posibles. De este modo, el número de quarks llegó a ser igual a $4 \times 3 = 12$.

A veces, en lugar de valerse de la terminología que ya conocemos, se prefiere hablar no de cuatro quarks de tres colores cada uno, sino de "cuatro aromas y tres colores" del quark. Sin embargo, está claro que la cuestión radica no en la terminología, sino en el problema de por qué razón surgió la necesidad de introducir estos cuatro aromas y tres colores y en el de si no se obtiene otra vez una cantidad demasiado grande de partículas "fundamentales" en la teoría.

Este último temor es tanto más fundamentado que de los doce quarks (y un número igual de antiquarks) puede "combinarse" una cantidad desmesurada de "partículas", incluso en el caso de contar solamente las combinaciones de a tres (para los bariones) y de a dos (para los mesones), lo que, a su vez, también exige una justificación. Muchas de estas combinaciones, con plena evidencia, no tienen nada que ver con el experimento, es decir, resultan ser "de sobra". Para corregir la situación se introduce un requerimiento complementario que se quisiera denominar "principio de incoloración". De acuerdo con este principio, todas las partículas observadas deben ser "blancas" o bien, lo que es equivalente, "incoloras". Esta finalidad puede alcanzarse ya sea cuando están representados, en pie de igualdad, todos los colores para cada aroma, o bien, cuando junto a cada quark coloreado se encuentra el antiquark del mismo color y aroma.

Esta restricción disminuye bruscamente el número de posibilidades, sin embargo, queda todavía una cantidad sumamente grande de éstas. Además, no está del todo claro cuáles resultan preferibles. Así, por ejemplo, ¿qué (cuáles) juego de los quarks forma el protón? Antes contestamos: dos quarks p y un quark n. Ahora todos los

quarks son tricolores. Aunque sabemos que el "principio de incoloración" prescribe a todos los tres quarks tener diferentes colores, pero por ahora ignoramos qué precisamente.

Sin embargo, como resulta, no hay necesidad de precisarlo. La cuesión reside en que los quarks no sólo deben "estar presentes" en las partículas, sino que también tienen que unificarse por algo. Como ya hemos expuesto antes, en la teoría cuántica esta unificación aparece como resultado del intercambio de los cuantos de cierto campo, cuantos transportadores de la interacción. En las construcciones teóricas que, actualmente, gozan de mayor popularidad el papel de semejantes transportadores lo desempeñan los llamados "gluones", grupo de partículas con el espín igual a $\hbar$ y la masa en reposo nula. La emisión y la absorción del gluon por el quark no varía el aroma de este último, pero cambia su color. En forma patente se puede figurar que el intercambio incesante de gluones obliga cada quark a cambiar de color, de modo que, como resultado, el sistema en su conjunto todo el tiempo permanece incoloro, y no se ve destacada ninguna de las variantes de distribución de los colores entre los quarks. Por la misma causa también se puede abstenerse de fijar el color del par quark-antiquark que forma cualesquiera de los mesones (cuál, precisamente, depende del aroma de los quarks). Esta circunstancia simplifica considerablemente el análisis de todas las combinaciones posibles.

No es difícil adivinar que el juego de gluones que pueda asegurar el transporte de todos los colores entre todos los tipos de quarks debe ser lo suficientemente rico. Sin embargo, es mucho más difícil llegar a la comprensión de aquellas deducciones sacadas de las variantes más sugestivas de la teoría del intercambio gluónico

que atañen a la energía de interacción de los quarks. Dicha energía, al igual que en las teorías "ordinarias" con las que tuvimos que tratar anteriormente, depende de la distancia entre las partículas en interacción. Pero es que esta dependencia deja la impresión de muy inesperada. Estamos acostumbrados a que a medida que aumenta la distancia la interacción disminuye. Ahora bien, en la teoría de los quarks, por lo visto, puede indicarse una variante en que la interacción entre los mismos incrementa constantemente a medida que crece la distancia.

Para tal situación muchas cosas obtienen una tonalidad nueva y muy interesante. Los quarks dispuestos de modo compacto dentro de las zonas de dimensiones "bariónicas" y "mesónicas" típicas se deben comportar casi como libres. A propósito, esto tiene que manifestarse en los experimentos sobre la dispersión de las partículas de energías muy altas, por ejemplo, de electrones, aunque sea en los tantas veces mencionados protones y neutrones. Durante tal dispersión los electrones deben "percibir" los quarks como ciertas partículas puntuales independientes que llenan el "interior" de los nucleones. Estas "subpartículas" puntuales libres, para las cuales hasta se inventó el nombre de "partones", parecen vislumbrarse, cada vez con mayor seguridad, en los experimentos.

Mas es otra circunstancia la que reviste mayor valor e interés: encuentra una explicación natural el hecho de que nadie, a pesar de las más meticulosas búsquedas (se buscó incluso en el suelo lunar) pudo hallar quarks libres.

En efecto, teniendo en cuenta el mencionado potencial creciente, el quark, simplemente, es incapaz de escaparse del cautiverio de la interacción para ponerse en libertad. Incluso si tratamos de "extraerlo" del seno de la partícula, re-

sultará que, por muy considerable que sea la energía que invertimos, ésta, en fin de cuentas, se consumirá para engendrar los pares quark-antiquark los cuales se registrarán como mesones, y en cuanto a la liberación de un quark individual, este propósito, de todos modos, quedará sin lograr.

Aquí viene el caso señalar que los mesones engendrados (y su nacimiento puede tener lugar virtualmente y sin acción externa) pueden y deben intervenir como "vehículos de segunda generación" de las interacciones entre nucleones y otros bariones. En este sentido, las interacciones fuertes que hemos discutido antes se reducen a ciertas interacciones "primarias" más fundamentales de los quarks.

Según la expresión de Sh. Glashow. uno de los teóricos que trabaja activamente en el campo de "cromodinámica" —como, con frecuencia, suele denominarse la teoría de los quarks de color— "las interacciones de los hadrones* incoloros no es más que un resto débil de la interacción fundamental de los quarks de color. De la misma forma como las fuerzas de Van der Waals entre las moléculas no son sino una huella débil de las fuerzas electromagnéticas que atraen los electrones al núcleo, las fuerzas intensas que actúan entre los hadrones son tan sólo una huella débil de las fuerzas que actúan en el interior de un hadrón individual".

No es difícil atinar que la "cromodinámica" atañe no solamente a las interacciones fuertes, sino también a las débiles. Aquí, una vez más, tenemos que recordar el modelo de Weinberg y Salam, pero teniendo en cuenta que por las interacciones débiles de los hadrones responden

---

* Es decir, partículas de interacción fuerte.

los quarks que los integran y que intercambian bosones vectoriales. Sin embargo, aquí nos encontramos con algo nuevo de principio: si bien el intercambio de gluones varía solamente el color de los quarks, sin afectar su aroma, la emisión y la absorción de los bosones vectoriales pesados, por el contrario, sólo hace cambiar el aroma, es decir, provoca la transformación de los quarks de un tipo en otros.

El quark encantado

Y ahora es el momento más oportuno para volver a la conversación sobre el cuarto quark. Varias causas obligan a los teóricos a hablar de su necesidad. Una de éstas tiene el aspecto bastante formal, por lo menos, a primera vista. Se conoce bien que los cuatro leptones se dividen en dos grupos bastante aislados: forman parte de uno el electrón y el neutrino electrónico, y de otro, el muón y el neutrino muónico. Dentro de cada grupo una partícula puede transformarse en otra al emitir (o absorber) un bosón vectorial cargado. Una partición similar es deseable también para los quarks. Sin embargo, ésta puede alcanzarse sólo al introducir en el examen un quark más, el cuarto (se sobreentiende que en las tres modificaciones de color). Este nuevo quark lleva el nombre de "encantado" y se designa con la letra *c* (del inglés "charm", encanto; a veces, esta palabra inglesa se emplea tal como está, sin recurrir a la traducción).

Como suele ocurrir, la introducción de un nuevo quark refleja la introducción de un nuevo número cuántico que se denomina "encanto" (o, también, "charm"). Los cuatro tipos (aromas) de quarks pueden compararse por medio de una nueva pequeña tabla:

Designación	Masa, GeV	Carga eléctrica	Extrañeza	Encanto
p	0,336	+2/3	0	0
n	0,338	—1/3	0	0
λ	0,540	—1/3	—1	0
c	1,5	+2/3	0	+1

A semejanza de como la extrañeza fue introducida para explicar la "inhibición" de algunos procesos (que, en parte, se discutieron antes), el encanto también debe servir, en fin de cuentas, para la explicación de los hechos experimentales análogos. Y entre estos datos, tal vez, el más interesante sea el descubrimiento en 1974 de *una nueva partícula*; descubrimiento que se llevó a cabo independientemente en Brookhaven y en Standford. La partícula en cuestión que se designa con j o ψ es un mesón, tiene la masa cerca de 3,1 GeV (lo que más que al triple supera la protónica) y "vive" un período del orden de 10^{-20} s, lo que sobrepasa mil veces el lapso que le "conviene", teniendo tal masa.

Muchos rasgos de la partícula ψ encuentran su explicación si ésta se considera como combinación del quarks c y de su antiquark. Este sistema posee un "encanto oculto", por cuanto el encanto total es igual a cero. Cuando c y $\bar{c}$ se aniquilan, puede formarse, por ejemplo, un fotón virtual que más tarde se transformará en un par electrón-positrón. También puede desarrollarse la reacción inversa: la aparición de ψ durante la aniquilación del par electrón-positrón. A propósito, estas dos reacciones (la desintegración de la partícula ψ en un par electrón-positrón y la creación de ψ durante la aniquilación de este par) fueron utilizadas, precisamente, en el descubrimiento del mesón ψ.

La teoría dice que en el sistema c-$\bar{c}$ cuya desintegración se inhibe parcialmente en virtud de la presencia del encanto oculto puede haber varios niveles de energía que recuerdan los atómicos. Es que el quark y el antiquark encantados llevan cargas eléctricas opuestas por su signo, y éstos deben girar alrededor de un centro común de masas, formando algo que hace recordar en alto grado el "positronio", o sea, un sistema que consta de electrón y positrón; este parecido encontró su reflejo incluso en el nombre consonante de "charmonio".

El juego de niveles de energía del charmonio presagiado por la teoría es bastante rico. Las energías de estos niveles pueden tomar los valores de 4,4 GeV, 4,1 GeV, 3,9 GeV, 3,7 GeV, 3,55 GeV, 3,5 GeV, 3,4 GeV, 3,1 GeV y 2,8 GeV. Al igual que en los átomos, las transiciones entre los distintos estados deben acompañarse (por supuesto, si tiene lugar la transición a un nivel más bajo) de emisión de fotones; la única diferencia consiste en que aquí estos fotones poseen energías muy altas, es decir, son cuantos γ duros.

Los distintos niveles del charmonio deben manifestarse como mesones de masas (dentro de los límites de tres a cuatro GeV, aproximadamente) y tiempos de desintegración diferentes. Algunas de semejantes partículas, entre éstas también ψ, fueron detectadas, efectivamente. En cambio, otras partículas, al igual que las poseedoras de encanto, explícito (es decir, aquellas cuyo número cuántico de encanto, "charm", es distinto de cero) fueron halladas mucho tiempo después.

En las investigaciones realizadas actualmente un lugar importante pertenece a los experimentos con los neutrinos. La teoría predice que, al caer sobre el nucleón del blanco, digamos, un neutrino muónico, pueden engendrarse un muón ne-

gativo y dos quarks, con la particularidad de que uno de estos últimos será encantado y otro extraño. La desintegración del quark encantado da lugar a la aparición de dos leptones (μ^+ y ν_μ, o bien, e^+ y ν_e). Además (por cuanto durante la desintegración del quark encantado se engendra el quark extraño, y, por añadidura, el segundo quark semejante es engendrado por el neutrino primario), en estado final deben aparecer dos partículas extrañas. Precisamente las reacciones de este tipo que vienen acompañadas de aparición de dos leptones (y de dos partículas extrañas), se investigan de modo escrupulosísimo en los experimentos con los neutrinos que hoy en día se realizan en una serie de países.

El descubrimiento de la partícula ψ y, más tarde, también de otros mesones vaticinados por la teoría del charmonio suscitó un nuevo aumento del interés hacia el modelo de los quarks y la "cromodinámica".

En 1972 fueron descubiertos nuevos leptones pesados que recibieron el nombre de leptones τ (leptones tau); por analogía con los mesones μ se denominan también mesones τ. Son partículas cargadas positiva y negativamente cuya masa supera 3,5 mil veces la del electrón. Si nuestros conceptos generales sobre los leptones son acertados, entonces deben existir nuevos neutrinos ν_τ y, correspondientemente, antineutrinos $\bar{\nu}_\tau$ relacionados con los leptones τ.

Finalmente, se hallaron mesones neutros superpesados que se denominaron mesones "ípsilon" (mesones υ) con una masa 10 veces superior a la del protón. Si se quiere incluir los "ípsilones" en el marco del modelo de los quarks es necesario suponer que existen quarks de mayor masa que el quark *c*. Para la conservación de la simetría quark-leptón es preciso introducir de dos nuevos quarks correspondientes al par "leptón τ

—neutrino ν_τ". Estos quarks recibieron los nombres de "top" (en inglés significa "cumbre") y "bottom" ("fondo").

A guisa de conclusión nos permitimos insertar el "retrato" del quark encantado propuesto por Alvaro de Rújula en la XVIII Conferencia Internacional para la Física de Altas Energías que se celebró en Tbilisi (capital de la RSS de Georgia) en verano de 1976.



Nosotros ignoramos todavía muchas cosas. En particular, tampoco podemos contestar con precisión a la pregunta puesta al principio de este libro: ¿Cuántos tipos fundamentales de interacción existen? (Aunque aún recientemente hemos estado casi seguros de que existen solamente cuatro tipos semejantes.)

La verdad purísima
Siempre yo escribo.
Qué será más tarde,
No me imagino.

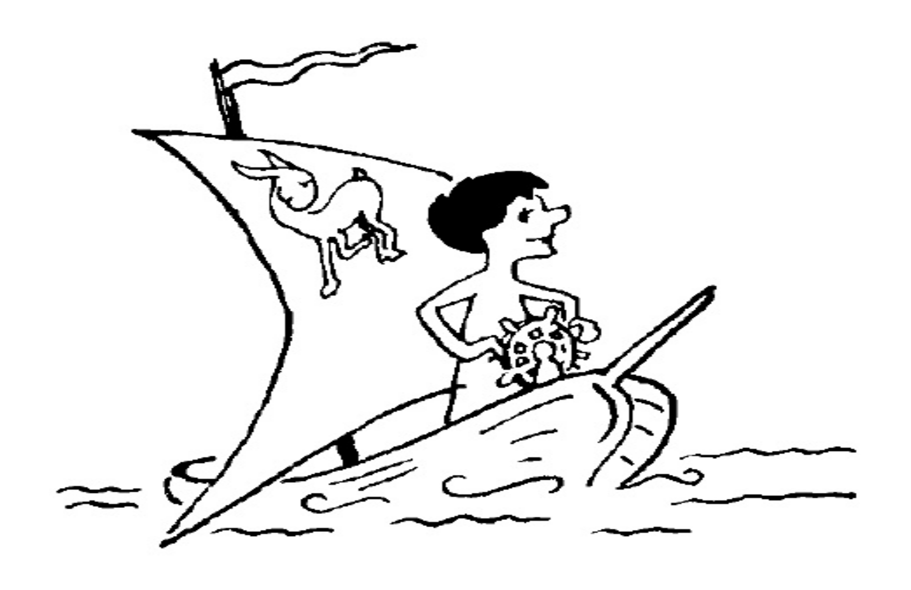
M. Arjánguelski,
Parodias literarias

CONCLUSIÓN

LA CUAL, CONTRARIAMENTE A LO ACOSTUMBRADO, NO CONCLUYE NADA

Ante el investigador se perfila un majestuoso y armónico cuadro de interacciones. Los tipos principales de fuerzas dan la clave para la comprensión de los procesos infinitamente variables. Son muy disímiles entre sí, estos tipos fundamentales de interacción, pero, al mismo tiempo, los vinculan los lazos de profunda unidad.

Son disímiles. Sí, efectivamente, es grande la diferencia, digamos, entre las fuerzas gravitacioneles y las nucleares. Hasta las esferas de su acción acusan una diferencia manifiesta. Como parece a primera vista, para cada tipo de fuerzas estas "esferas de influencia" pueden definirse con gran precisión. Las fuerzas gravitacionales reinan en el mundo de los objetos cósmicos. La esfera en que se convierten en primordiales las fuerzas electromagnéticas incluye los átomos, las moléculas y los pedazos de sustancia que se integran de éstos. La región en que actúan las fuerzas nucleares es todavía más reducida: son los núcleos de los átomos. Y, finalmente, cuando se llega a las interacciones débiles, se



quiere decir, en mayor medida que de cualquier otro tipo de fuerzas, que dichas interacciones determinan los procesos que se desarrollan en la esfera íntima de las partículas a partir de las cuales se constituye toda la materia, incluyendo los núcleos atómicos.

Así, pues, la primera y la más aproximada clasificación de las fuerzas de acuerdo con las esferas de su acción tiene el siguiente aspecto:

Cosmos — átomo — núcleo — partícula

El segundo indicio es la magnitud de las fuerzas o, más exactamente, la de las energías correspondientes a distintas interacciones. La interacción nuclear sobrepasa cien veces, aproximadamente, la electromagnética y 100 000 mil millones de veces la "débil". En cuanto a la interacción gravitacional de dos electrones, ésta es menor que la culombiana tantas veces que deberíamos escribir un número con cuarenta y dos ceros.

Podríamos añadir muchas cosas al relato sobre aquello en que son disímiles las fuerzas fundamentales. Pero por mucho que hablemos sobre su diferencia, no hay nada que pueda hacernos perder de vista otro aspecto de principio del problema: la unidad de todas las fuerzas.

Tomemos, por ejemplo, la cuestión sobre la división de las "esferas de influencia". ¿Acaso esta división es tan absoluta? ¿Acaso es posible al hablar, por ejemplo, sobre los objetos cósmicos no tomar en consideración las fuerzas nucleares? ¿O las electromagnéticas? ¿o bien, finalmente, las interacciones débiles? No, claro que no! Pues proceder de esta forma significa borrar toda la física de las estrellas.

Ahora bien, examinemos otro aspecto. ¿Acaso en el núcleo son esenciales solamente las fuerzas nucleares? Otra vez tenemos que dar una respuesta negativa. Tanto las interacciones electromagnéticas, como las débiles también aquí ejercen una influencia considerable. Más aún, según la opinión de una serie de investigadores, incluso las fuerzas gravitacionales cuyo "campo de acción clásico" son los objetos cósmicos, pueden irrumpir en el "micromundo", desempeñando un papel importante en la formación de las propias partículas.

Por consiguiente, al "distribuir por los anaqueles" los tipos principales de interacción, nos cercioramos inmediatamente de que el "semblante del mundo" viene determinado por todo su conjunto, así como por su superposición y combinación profundamente armónica.

El mundo es íntegro. Esto se refiere también al mundo de las interacciones.

En la actualidad, el número de partículas elementales verdaderas de las cuales está constituida la materia disminuyó bruscamente. Son leptones, entre los cuales se incluye también el electrón, y los quarks. De los quarks están construidos los protones y neutrones que componen los núcleos atómicos.

Las interacciones electromagnéticas y débiles ya están unificadas dentro del marco de una sola teoría matemática. Aunque, de verdad, esta

teoría, a pesar de todo, no puede considerarse como teoría única y en plena medida consumada de las interacciones electromagnéticas y débiles: el cuanto del campo electromagnético —el fotón— se introduce en la teoría independientemente de los transportadores de la interacción débil, o sea, de los bosones vectoriales intermedios.

La teoría unificada de las interacciones electrodébiles pasó una buena comprobación experimental solamente para las energías bastante bajas. A los creadores de esta teoría —S. Weinberg, A. Salam y Sh. Glashow— se adjudicó el premio Nobel. Sin embargo, como dijo Glashow, El Comité de estos premios corrió cierto riesgo, puesto que en el campo de altas energías esta teoría no obtuvo todavía confirmaciones experimentales. Los aceleradores modernos no son capaces aún de acelerar las partículas hasta energías necesarias. Los vehículos de las interacciones débiles —los bosones W^+, W^- y Z^- — no se han descubierto por ahora experimentalmente. Pero la mayoría de los físicos está convencida de que la teoría, en su base, es correcta, y que la demostración experimental de su validez se obtendrá también en el campo de altas energías.

El problema embrollado de creación de la teoría de las interacciones fuertes que hace unos veinte años parecía insoluble, comienza a desenredarse. La cromodinámica cuántica describe exitosamente las interacciones de los quarks por medio del intercambio de gluones. Lamentablemente, es verdad que los cálculos lo suficientemente estrictos sólo pueden verificarse para los quarks dispuestos a pequeñas distancias unos de otros. Con el aumento de la distancia las fuerzas de interacción entre los quarks incrementan hasta tal grado que se tornan dificultosos los cálculos cuantitativos rigurosos. Las ecuaciones que describen el protón o el neutrón como siste-

mas de quarks retenidos por los gluones no son menos simples que las ecuaciones que definen los núcleos de la parte media de la tabla de Mendeléiev en tanto conjunto de protones y neutrones. Por el momento nadie sabe resolver las ecuaciones de este tipo.

El momento desagradable de las teorías modernas de las interacciones lo es la necesidad de introducir en su estructura cerca de 20 parámetros (constantes) cuyos numéricos no derivan de la teoría. Son, en primer término, las constantes de interacción (carga eléctrica, carga de color, constante gravitacional) y las masas de las partículas (de los leptones, quarks, etc.). Mientras tanto, los valores de estos parámetros en la teoría difícilmente pueden considerarse como arbitrarios. El físico inglés Hawking escribe con este motivo lo siguiente: "En la realidad, se crea la impresión de que ni las condiciones iniciales, ni los valores de los parámetros en la teoría son arbitrarios, ni mucho menos, sino son elegidos de un modo sumamente escrupuloso. Por ejemplo, si la diferencia entre las masas del protón y del neutrón no hubiera sido próxima a dos masas electrónicas, no se habrían obtenido cerca de dos centenares de núcleos estables que forman los elementos y representan la base de la química y la biología. Análogamente, si la masa gravitacional del protón hubiera sido sustancialmente otra, no habrían existido las estrellas en que habrían podido formarse estos núcleos. Y si la expansión inicial del Universo hubiera sido algo menor o algo mayor, entonces, el Universo habría experimentado el colapso antes de que estas estrellas tuviesen tiempo para la evolución, o bien, se habría expansionado con tanta celeridad que la condensación gravitacional nunca hubiese llevado a la formación de las estrellas".

El problema global de la teoría consiste en la reducción al mínimo del número de parámetros arbitrarios —o, idealmente— en su completa eliminación.

Después de la construcción, coronada con el éxito, de la teoría unificada de las interacciones electromagnéticas y débiles, aparecieron, como es natural, tentativas de crear teorías aún más universales. En primer término, se hacen intentos de unificar la teoría de las interacciones electrodébiles con la cromodinámica cuántica, es decir, con la teoría de las interacciones fuertes. Esta teoría recibió el nombre de "gran unificación". En ella se supone, desde el principio mismo, considerar todas las partículas fundamentales de espín semientero —o sea, los leptones y los quarks— como miembros de una familia única. Se admiten las transformaciones, a altas energías, de los quarks en leptones, y viceversa.

Pero se sabe que los leptones y los quarks se diferencian entre sí, en alto grado, por sus masas y por otras características. Aparentemente, las interacciones de los quarks (interacciones fuertes) no recuerdan, en modo alguno, las de los leptones (electromagnéticas y débiles). ¿Cómo pueden describirse todas ellas dentro de los márgenes de una interacción única? Uno de los teóricos norteamericanos que trabaja activamente sobre la teoría de la "gran unificación", Giorgi, da la siguiente respuesta a esta pregunta: "La teoría única no se afana por encubrir estas diferencias, ésta afirma tan sólo que no son fundamentales. Estas diferencias se notan, principalmente, debido a que el Universo, en la actualidad, se encuentra en estado frío y las partículas, en término medio, poseen baja energía. Si se ofreciera la posibilidad de realizar los experimentos a energías superaltas, la unidad buscada se nos presentaría en todo su evidencia y senci-

llez. Los leptones y los quarks, libremente, se transformarían unos en otros y todas las tres interacciones poseerían la misma fuerza.

De conformidad con las evaluaciones, la energía necesaria para que se observe la unidad de las partículas y de las fuerzas en la forma tan cautivadora debe ser del orden de 10^{15} GeV (1 GeV es la energía comunicada al electrón cuando éste se acelera por la diferencia de potencial de 1 mil millones de voltios). Esta energía sobrepasa 10 billones de veces las posibilidades hasta de los más grandes aceleradores que se planifican, y es poco probable que semejante energía se obtenga un día u otro en las condiciones de laboratorio. Siendo así, puede parecer que la teoría no llegaría a comprobarse nunca, pero es una opinión equivocada. La teoría hace pronósticos determinados para energías completamente alcanzables".

Uno de los presagios de este tipo es el referente a la inestabilidad del protón. Su tiempo de vida, como predice la teoría, es del orden de 10^{31} s. Pero no olvide que la inestabilidad del protón significa la inestabilidad de todos los núcleos y, por consiguiente, de todos los átomos. A pesar de que el tiempo de vida del protón es enorme y supera muchas veces el de expansión del Universo, ya hoy en día se realizan experimentos para observar la desintegración de los protones. En particular, también en la Unión Soviética. Es que cualquier pedazo de materia contiene gran cantidad de protones, y existe la probabilidad de desintegración de varios entre éstos.

La nueva teoría encierra la posibilidad de explicar el exceso de partículas en el Universo en comparación con las antipartículas. Y esto se hace teniendo en cuenta la condición de que en el estado inicial del Universo en expansión las can-

tidades de partículas y antipartículas habían sido las mismas.

Por fin, se hacen intentos de unificar todos los cuatro tipos de interacciones, incluyendo la gravitación. Este enfoque recibió el nombre de "supersimetría" o de "supergravitación". Aquí, ya en una familia se unen partículas con espines diferentes. Lo más notorio es que en esta teoría se reduzca bruscamente el número de parámetros arbitrarios.

Por lo demás, la construcción de teorías íntegras que unifiquen tres o incluso cuatro tipos conocidos de interacciones está todavía lejos de consumarse.

Hoy en día sólo se puede discutir cuál será la nueva teoría. Discutir y buscar.

Queda evidente una sola cosa: esta teoría nos dará la posibilidad de comprender mejor la naturaleza.

"Comunicamos sobre nuevos descubrimientos no para sembrar confusión en las cabezas, sino para iluminarlas; no para destruir la ciencia, sino para fundamentarla realmente". Estas palabras las pronunció Galileo hace tres siglos y medio. También a él le pertenecen las siguientes palabras: "Aquí se ocultan secretos tan profundos e ideas tan sublimes que, a pesar de los esfuerzos de centenares de pensadores más ingeniosos quienes trabajaron durante milenios, no se logró todavía penetrar en éstos, y, al igual que antes se mantiene viva la alegría de las búsquedas creadoras y de los descubrimientos". Estas palabras no perdieron, en absoluto, su actualidad.